

# COMSOL NEWS

多物理场仿真杂志

## 潮汐发电

仿真优化涡轮机设计  
保护海洋生物

P 26

# 多物理场仿真推动 科技创新

本期 COMSOL News 介绍了 12 个 COMSOL 用户如何受益于多物理场仿真和仿真 App 的应用案例。

研发人员通过数值模拟的方法优化设计流程,加速新产品开发、提高生产效率,同时促进企业的可持续发展。例如,杜比实验室将仿真与测试相结合设计出超薄全景声扬声器,带给消费者身临其境的音频体验;NKT 公司通过电缆仿真展示了当物理测试过于昂贵时,虚拟测试可以降低成本,加速产品开发进程;咨询公司 Physixfactor 通过仿真设计开发了一种新型水力涡轮机,能够利用海洋潮汐能进行可持续水力发电。

此外,您还将了解到多个关于使用 COMSOL Multiphysics® 创建和部署仿真 App 的应用案例, Mahindra & Mahindra 公司的汽车仿真 App、L-Acoustics 公司的音频产品设计仿真 App、Plastometrex 公司的材料测试仿真 App,以及新泽西理工学院用于远程学习和虚拟实验的仿真 App 库。在这些案例中,COMSOL® 用户创建了可供更多人员使用的专属仿真工具。

希望您能从本期 COMSOL News 中获取灵感!

祝您阅读愉快!

Brianne Christopher  
COMSOL



参与 COMSOL 社区互动

COMSOL 博客 [cn.comsol.com/blogs](http://cn.comsol.com/blogs)

微信 COMSOL-China

微博 COMSOL 中国

我们期待您对本刊的意见和建议,欢迎通过 [info.cn@comsol.com](mailto:info.cn@comsol.com) 与我们联系。

© 2021 COMSOL 版权所有。COMSOL、COMSOL Multiphysics、Capture the Concept、COMSOL Desktop、COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产,COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联,亦不由其担保、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 [cn.comsol.com/trademarks](http://cn.comsol.com/trademarks)。

仿真保障大型演出的  
高品质音效

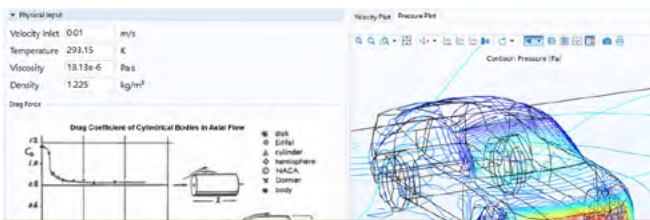
P 30

# 目录



## 产品开发

- 4 为家庭影音娱乐系统开发超薄杜比全景声扬声器  
杜比实验室, 美国
- 10 高压电缆中铠装损耗的三维模拟  
NKT 公司, 瑞典
- 24 无导线心脏起搏器的体内通信  
MicroPort CRM 公司, 法国



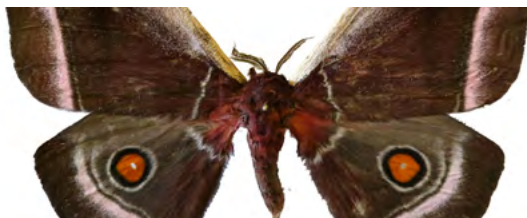
## 仿真 App 应用

- 7 借助仿真 App 开展远程实验课程教学  
新泽西理工学院, 美国
- 14 仿真 App 加速汽车产品开发进程  
Mahindra & Mahindra 公司, 印度
- 30 看见声音: 仿真揭示音箱设计对扬声器性能的影响  
L-Acoustics 公司, 法国



## 设计优化

- 17 优化用于制冷技术的换热器设计  
thermofin 公司, 德国
- 26 兼顾鱼类保护的水力涡轮发电机设计  
Physixfactor 公司, 荷兰
- 38 多物理场仿真优化气体流量计设计  
Raychem RPG 公司, 印度



## 科研聚焦

- 20 绿化城市中心: 花园式城市屋顶排水系统设计  
TL-Engineering 公司, 丹麦
- 34 仿真探究飞蛾翅膀的声学伪装特性  
布里斯托大学, 英国
- 41 仿真优化高性能钨材料的制备工艺  
Forschungszentrum Jülich 研究中心, 德国

## 特邀评论

- 44 仿真 App 助力测试、检验和认证行业的数字化创新  
Plastometrex 公司, 英国

杜比实验室, 美国

# 为家庭影音娱乐系统开发 超薄杜比全景声扬声器

三维环绕声技术能为消费者创造优质的沉浸式音频体验。总部位于美国加利福尼亚州旧金山的杜比实验室是这项技术的行业领先开发者。最近,他们在声学仿真的帮助下为电视影音系统开发了革新性的杜比全景扬声器技术。

作者 RACHEL KEATLEY

雨滴溅落在叶面上,巨嘴鸟在远处叽喳鸣叫,沙沙作响的声音充斥在你左耳边,你循声望去,发现一只美洲虎正紧紧盯着你.....

听起来好像你正在亚马逊雨林中跋涉,但实际上你只是坐在客厅里看电影。三维环绕声技术创造出了身临其境的环绕声效果,能将听众完全融入电视屏幕内的故事中,带给人们全新的家庭娱乐体验方式。

随着数字技术与真实世界的不断融合,越来越多的消费者期望从家庭影音娱乐系统中获得上述这种令人难忘又逼真的音频体验。作为创新音频系统和技术的行业

领先开发者,美国杜比实验室(Dolby Laboratories)正通过他们的杜比全景声(Dolby Atmos®)音频格式将三维音频技术引入家庭影音娱乐系统。

2014年,杜比实验室推出了用于家庭影音娱乐系统的杜比全景声扬声器(Dolby Atmos® enabled speaker)技术,并随后将这项技术扩展应用于其条形音响产品中。现在,他们正在开发用于电视的杜比全景声扬声器技术,以扩展沉浸式家庭音频技术应用的边界。

## » 杜比全景声扬声器技术的原理

为了再现逼真的置顶音效,杜比全景声扬声器技术采用向上发射声场的扬声器设计,将声音向上辐射至天花板然后再返回,如图1所示。他们在扬声器上应用了感知过滤技术,以增强消费者的高度感知力,使听众能够感知到声音是源自天花板上的反射点,而不是扬声器的实际位置。“如果使用传统的电视扬声

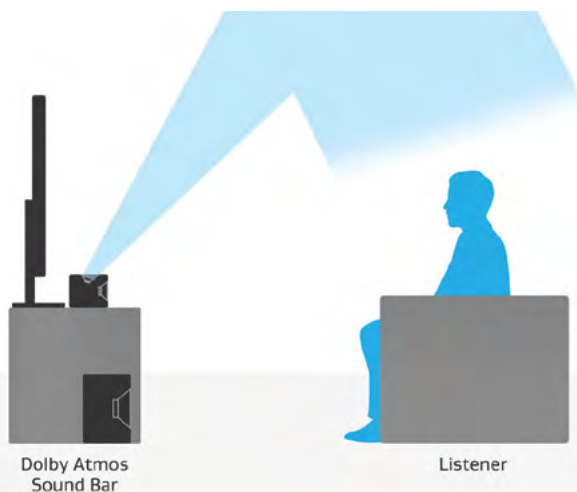


图1 常规(大尺寸)高位声道扬声器示意图。图注: Dolby Atmos Sound Bar – 杜比全景声条形音箱; Listener – 听众

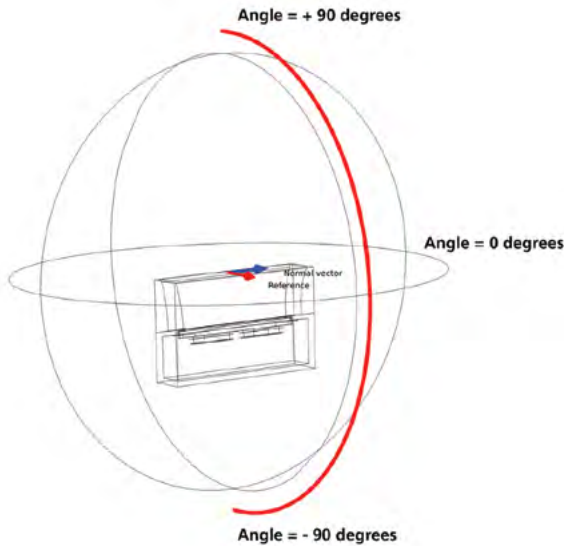


图2 带有集成声反射器的超薄扬声器指向性评估平面。图注：Normal vector – 法向矢量；Reference vector – 参考矢量

器，你会听到从电视扬声器传出的声音；而使用杜比全景声反射式电视扬声器，你会听到来自天花板的置顶音效。”杜比实验室高级音响系统和传感器工程师 Lakshmikanth Tipparaju 说道。

### » 设计超薄电视扬声器的挑战

如果你经常关注最新的消费类电子产品，可能已经注意到电视机正逐年变得更加时尚和纤薄。然而电视机设计的

越纤薄，对设计杜比全景声扬声器带来的困难就越大。由于电视设计越来越紧凑，对于与边界表面紧密耦合、向上发射声场的扬声器振膜而言，其可用的形状和空间受到电视机厚度的限制就越来越多，从而导致发射到天花板的声场分布比较狭窄。

设计能够提供较大最佳听音点覆盖

区域的纤薄杜比全景声电视扬声器是一项关键挑战。“最佳听音点覆盖区域是指我们始终可以感知到高位声道顶部信息的位置。当我们离开最佳听音点覆盖区域时，感知到的顶部信息就会不全。”Tipparaju 说道。

为了设计出既足够薄可以安装在现代电视机中，又能提供更大的最佳听音点覆盖区域的杜比全景声扬声器，杜比实验室选择了声学仿真技术。Tipparaju

认为，仿真技术的主要优势是在构建和测试实际的物理原型之前评估新设计的扬声器的性能，从而节省宝贵的时间和资源。

### » 声学有限元分析和边界元分析

为了优化最佳听音点覆盖区域，Tipparaju 使用 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件进行了声学仿真，探索了几种不同的向上发射声场扬声器的设计概念。

Tipparaju 表示：“刚开始，我们制作了一个 2 英寸（约 5 厘米）厚的扬声器。”（标准的条形音箱的厚度大约为 5 英寸，或 13 厘米。）总体而言，它的视听效果非常逼真，但是我们希望我们的设计更具竞争力。”经过进一步的市场研究，Tipparaju 团队决定开发一种厚度为 1 英寸（约 2.5 厘米）的杜比全景声扬声器。为了满足超薄设计的需求，他们在扬声器的设计中加入了超薄微型换能器（9 厘米×1.5 厘米）。除此之外，他们还在扬声器的设计中增加了一个声反射器，用于高效地将声能再次分散至天花板。最终，他们扩大了扬声器的最佳听音点覆盖区域。

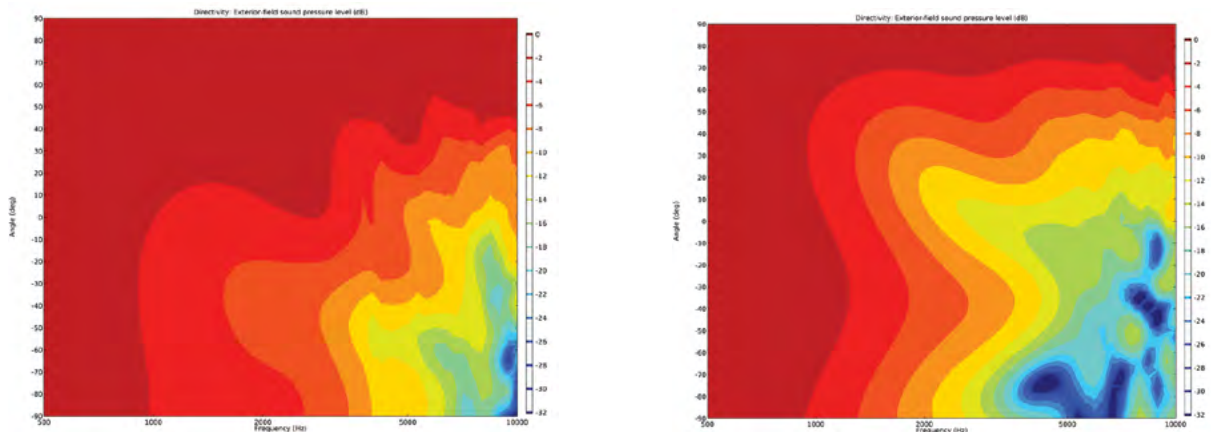


图3 带有集成声反射器的超薄扬声器（左）和不带声反射器的常规超薄扬声器（右）的垂直平面指向性仿真比较。图中显示出带有声反射器的扬声器对天花板反射具有更大的覆盖范围。

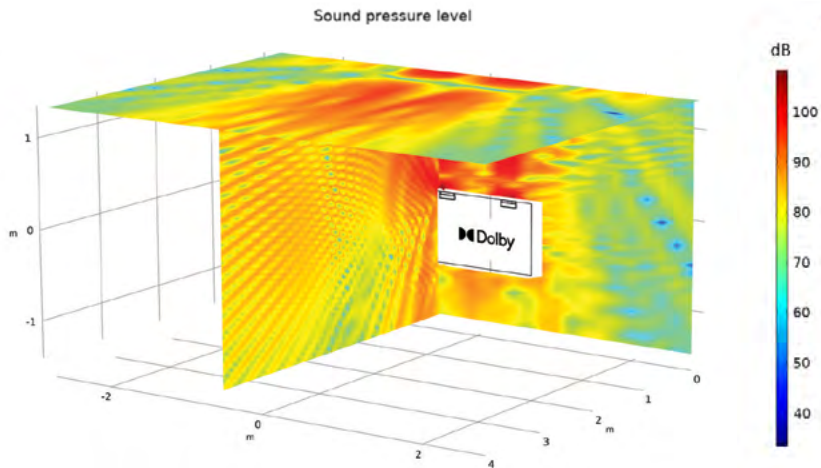


图 4 使用 COMSOL Multiphysics® 软件的多切面绘图功能绘制的频率为 10 kHz 时的声压级 (SPL) 分布。图注: Sound pressure level - 声压级

借助 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件中的声学有限元法和边界元法功能, Tipparaju 团队对声反射器的结构进行了拓扑优化。团队创建了一个非对称辐射模式, 使指向天花板方向 ( $0^\circ \sim +90^\circ$ ) 的能量分布最大, 并充分减弱直接到达听众方向 ( $0^\circ \sim -90^\circ$ ) 的声能, 如图 2 所示。

通过有限元仿真分析, 团队对基于自由场中的垂直平面指向性对声反射器的拓扑结构进行了优化。同时, 考虑到电视面板的集成限制和天花板反射, 他们通过边界元分析对声反射器的定向响应优势进行了数值评估。“我们要确保在听众的位置周围有统一的高位声道覆盖范围,” Tipparaju 表示, “通过仿真评估指向天花板方向的声压分布非常重要, 因为这有助于确定最佳的左右扬声器模块间距和换能器架构。”

在建模过程中, 杜比实验室还考虑了不同天花板高度的边界条件。Tipparaju 说: “在美国, 典型的天花板高度大约为 8 ~ 12 英尺 (2.4 ~ 3.6 米), 我们实际评估了不同高度条件下的扬声器响应。”

### » 使用近场扫描仪验证结果

基于仿真结果, Tipparaju 团队创建了带有集成声反射器的超薄高位声道扬声器的物理原型, 用于测试和验证结果。

团队通过与采用 Klippel 近场扫描仪测量系统获得的实验结果进行对比, 验证了有限元仿真得到的自由场声压结果。Tipparaju 说: “使用近场扫描仪的好处是, 我们可以在任意给定的空间或房间中进行快速三维消声声学测量。”

总体而言, 杜比实验室最终确定的集成声反射器可以显著改善超薄高位声道扬声器的沉浸式体验。为了进一步增强电视机的优质沉浸式音频体验, 杜比实验室目前正致力于将声反射器技术扩展应用到侧环绕电视扬声器中。

### » 沉浸式音频技术的未来

“我们团队的主要目标是开发出不同的声学硬件系统和技术, 以增加杜比全景声技术在不同消费类电子产品中的应用。” Tipparaju 说道。未来, 杜比还计划开发用于智能音箱和无线音箱的杜比全景声扬声器技术。



图 5 超薄微型换能器的原型 (左) 和厚度为 1 英寸 (约 2.5 厘米) 的超薄杜比全景声扬声器 (右)。

Tipparaju 表示, 这将是一次有趣的冒险, 因为他将需要设计出尺寸更小的扬声器, 包括麦克风阵列和其他扬声器。未来, 他将借助多物理场仿真开发硬件解决方案, 用于改善这类系统的沉浸式体验。☺

### 致谢

Lakshmikanth Tipparaju 对支持这项工作的经理 John Stewart, 消费者设备优化创新团队, 以及杜比全景声电视产品管理部的同事表示感谢。



Lakshmikanth Tipparaju, 杜比实验室音响系统和传感器高级工程师

新泽西理工学院, 美国

# 借助仿真 App 开展远程实验课程教学

新泽西理工学院的 Roman Voronov 教授与他的学生们使用 COMSOL Multiphysics® 软件设计了 15 个仿真 App, 用于全球的工程和实验课程远程教学。

作者 RACHEL KEATLEY

你可能曾经听说过: 人类注意力的平均持续时间比金鱼的还短。但这是真的吗? 这个发人深省的见解大约在 2015 年出现在数百条头条新闻中, 但对此持怀疑态度的人们认为这一说法并不完全具有说服力: 许多研究人员认为人类的注意力持续时间非常复杂, 不能仅仅将其简化为一个时间跨度(参考文献 1)。

或许人类的注意力持续时间无法与金鱼相比, 但是如今的数字化内容比以往任何时候都要多, 并且人类集中注意力的方式也在发生变化。为了吸引观众, 让他们乐

于参与互动, 生动地讲述一个故事非常重要。对于教师、演讲者和教授而言, 磨练这一技能尤为重要, 因为他们经常需要在一节课(50 ~ 90 分钟)的时间内持续吸引学生的注意力。

对于许多教育工作者而言, 在 2020 年 3 月吸引学生的注意力变得更加困难, 因为当时学校(和全球)因为新冠肺炎的迅速传播而关闭, 许多大学课程被迫改为远程教学。新泽西理工学院(New Jersey Institute of Technology) 化学和生物医学工程副教授 Roman Voronov 设计了 15 个易于使用的仿真 App, 帮助该校的教授向世界各地的学生以引人入胜的方式, 教授基础工程概念和实验课程。

## » 课堂内外的仿真

Roman Voronov 讲授与传递现象、传热传质和过程仿真技术相关的课程。“在传热传质课程的一个教学项目中, 我向学生介绍了一款数值仿真软件:

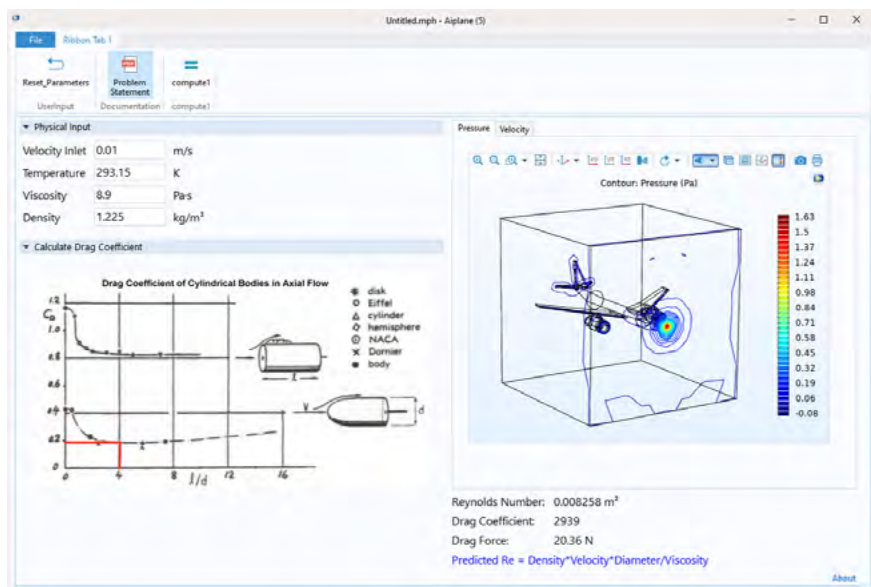


图 1 Voronov 教授和他的学生设计的一个仿真 App 示例, 它可以计算飞机周围的阻力系数。学生可以将仿真 App 的计算结果与圆柱体的圆形前缘阻力系数图进行比较。

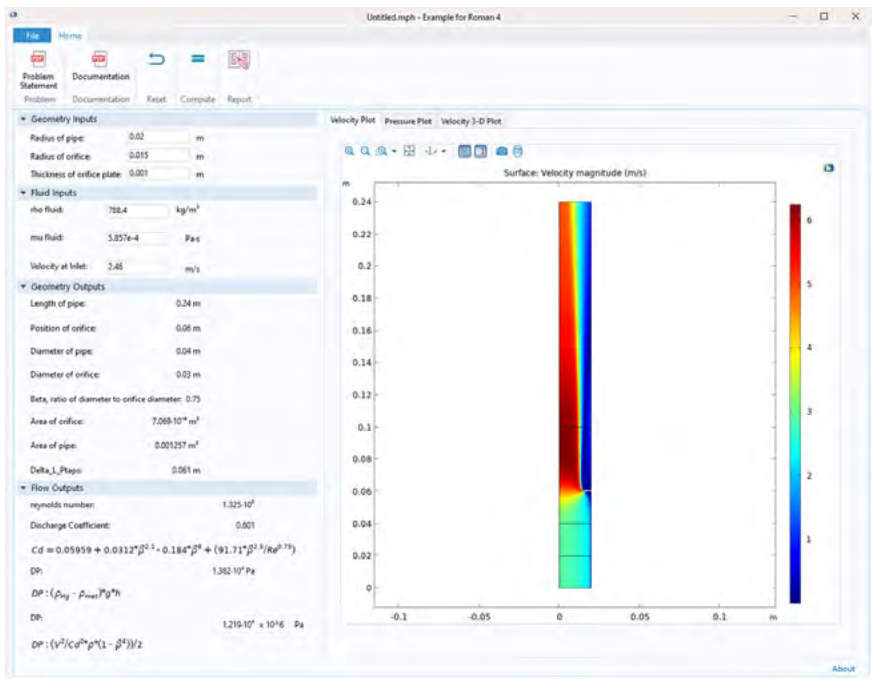


图 2 孔板流量计仿真 App 截图。

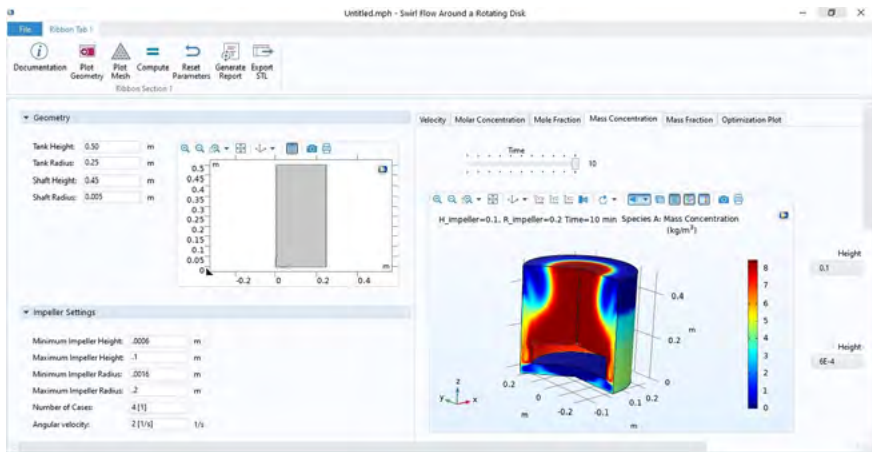


图 3 叶轮反应器仿真 App 的截图。该仿真 App 生成了一个 3D 打印叶轮的 CAD 文件,使学生可以在实验中对模拟结果进行验证。

COMSOL Multiphysics®。每当我使用 COMSOL® 多物理场仿真软件解决了一个问题,大家就会说:“这太容易理解了,因为我可以直观地看到正在发生的事情。”Voronov 说道。

此外, Vornov 认为, 向学生介绍先进的计算工具很重要, 因为这可以让他们在就业时具有独特的优势。“这不

仅仅是为了好玩, 知道如何使用这项技术最终会成为他们毕业后的一项工作技能。”Voronov 补充道。

在看到仿真技术对他的学生们产生了积极影响后, Voronov 希望世界各地的学生和教育工作者都能够更容易地获得这类工具。这一想法甚至在“远程教学”的概念变得家喻户晓之前已产生。

## » 面向学生的仿真 App 库

在 2020 年课程期间, Voronov 和他的学生们共同创建了一个由几个独立、可执行的仿真 App 组成的案例库。他们使用 COMSOL Multiphysics® 中的“App 开发器”工具创建了这些易于使用的应用程序。他们将模型封装为一个直观的用户界面, App 设计人员可以决定在界面上显示哪些输入和输出。通过 COMSOL 软件中的 COMSOL Compiler™ 产品, 他们将每个仿真 App 编译成独立的可执行文件, 这样就可以轻松地分发产品而无需管理额外的软件许可证。这项为期一年的项目由化学工程计算机辅助协会 (Computer Aids for Chemical Engineering, CACHE) 资助。CACHE 是一个非营利性组织, 旨在促进计算工具在化学工程中的使用。

最初, Voronov 计划设计一些可用作可视化教具的仿真 App, 使教授们可以在介绍基本工程概念时使用。然而, 当新冠肺炎爆发时, 项目的性质发生了改变。随着课程完全被转移到线上, 新泽西理工学院化学工程实验室的教授们发现了仿真 App 的新功能。他们可以在仿真 App 中模拟他们此前一直在实验室中进行的实验, 并将这些仿真 App 用作现场实验教学的补充, 在某些情况下, 甚至可以完全替代现场教学。

当了解到教授们对课程建模所需的实验室设备类型后, Voronov 和他的学生开始将仿真 App 引入实际教学中。

## » 探索 3 个专业的仿真 App

在完成 CACHE 资助的项目后, Roman Voronov 和他的学生们设计了 15 个仿真 App (参考文献 2)。尽管一



些仿真 App 是专为新泽西理工学院的特定工程课程和实验室设计的,但任何研究基础化学工程过程的人都可能对对这些仿真 App 产生兴趣。

在讨论仿真技术对实验课程的重要性时, Voronov 表示:“在实验室里,学生可以按照你的要求做实验,但他们并不总是能理解实验中发生的物理过程,然而仿真可以做到。”

Voronov 和他的学生们创建的一个仿真 App 可用于模拟管道中可压缩流体的流动。孔板流量计仿真 App 是专门为新泽西理工学院的一个化学工程实验室开发的,该实验室要求学生进行流体流动实验。在实验中,学生必须测量不同长度的管道中多个位置的压降。使用这个以预定实验为模型的仿真 App,学生可以通过改变管道的几何形状以及流体输入参数来了解这些变动如何影响结果。该仿真 App 还可以输出三维速度图和压力图,方便学生直观地了解实验中发生的物理过程。

使用叶轮反应器仿真 App,学生可以模拟两种物质在带有旋转圆盘形叶轮的非催化间歇反应器中的反应;还可以了解改变叶轮的尺寸如何影响间歇反应器中物质的浓度、质量分数,以及质量浓度。间歇反应器通常用于生产各种精细化工、制药和食品工业产品。此外,该仿真 App 还演示了如何使用参数化扫描对叶轮进行建模。Voronov 解释说:“我们期望仿真结果可以显示出最佳的叶轮形状和尺寸。根据仿真结果,学生可以生成一个可供 3D 打印的叶轮 CAD 文件。然后,他们可以打印出叶轮组件来研究它的实际性能。”

Voronov 为新泽西理工学院流体力学课程设计的汽车周围的气流仿真 App 模拟了空气流经汽车的过程。例如,在设计填充床、过滤装置和热交换器时,了解流体如何在其浸没的物体上流动非常重要。使用该仿真 App,学生可以在压力图中分析空气在汽车表面的梯度分布,在速度图中分析流经汽车的气流。

上述提到的所有仿真 App 以及其他 12 个仿真 App 均可在新泽西理工学院的官网上访问(参考文献 3)。运行这些仿真 App 需要在用户的操作系统上安装免费的 COMSOL Runtime™。

## » 一个获奖的仿真 App

Roman Voronov 的很多学生从新泽西理工学院毕业后,在他们的职业生涯中仍会继续使用仿真技术,有些甚至还因此获得了奖项。例如,2020 年毕业于新泽西理工学院的 Vasilios Halkias 开发的一个仿真 App 获得了 2020 年北美自由贸易区学生奖(2020 NAFEMS Student Award,参考文献 4)。这个获奖的仿真 App 模拟了管式流动反应器中的传质、传热和反应动力学。管式反应器在各种化学应用的设计中都非常重要。

Voronov 认为,除了用于虚拟教学和混合式学习之外,仿真 App 还将在课堂上占有一席之地。“我认为仿真 App 能让学生们真正理解他们正在测试的系统内部的原理。仿真 App 为他们提供了一个不同的视角,以及许多清晰的认知。”

## 参考文献

1. S. Maybin “Busting the attention span myth,” BBC News, 2017.
2. “Development of Computational-Based Tools and Modules for Chemical Engineering Education,” Computer Aids for Chemical Engineering, 2020.
3. R. Voronov, “COMSOL Apps,” New Jersey Institute of Technology, 2020. <https://web.njit.edu/~rvoronov/comsol-apps/>.
4. R. Tara, “Unable to Take Lab Course to Graduate, Student Turns to Simulation,” Engineering.com, 2020.

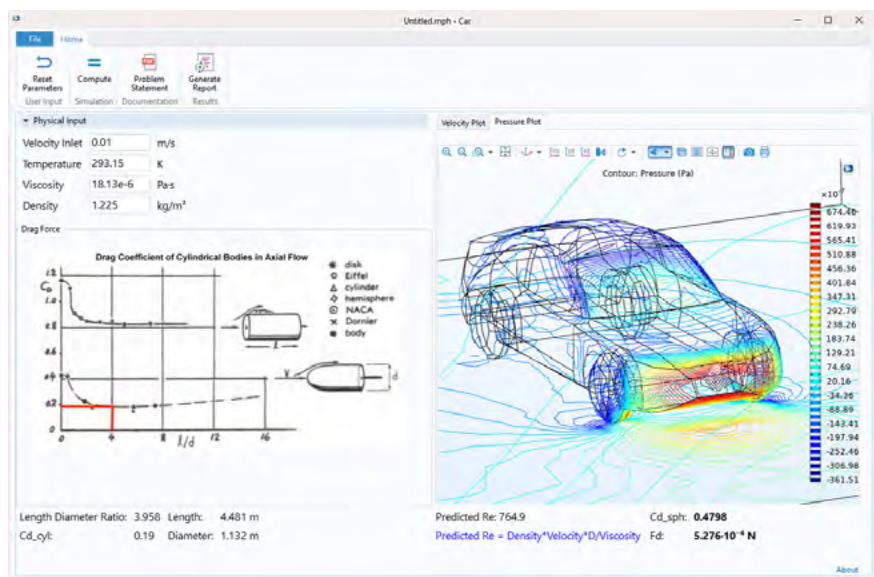


图 4 汽车周围的气流仿真 App,模拟了流经汽车的气流。新泽西理工学院的学生将此仿真 App 的计算结果与现有文献进行了比较。

NKT 公司, 瑞典

# 高压电缆中 铠装损耗的三维模拟

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

位于瑞典卡尔斯克鲁纳的 NKT 公司使用数值模型来研究电磁场,并计算了三维电缆设计中的铠装损耗。他们通过实验测量,对仿真结果的准确性进行了验证。

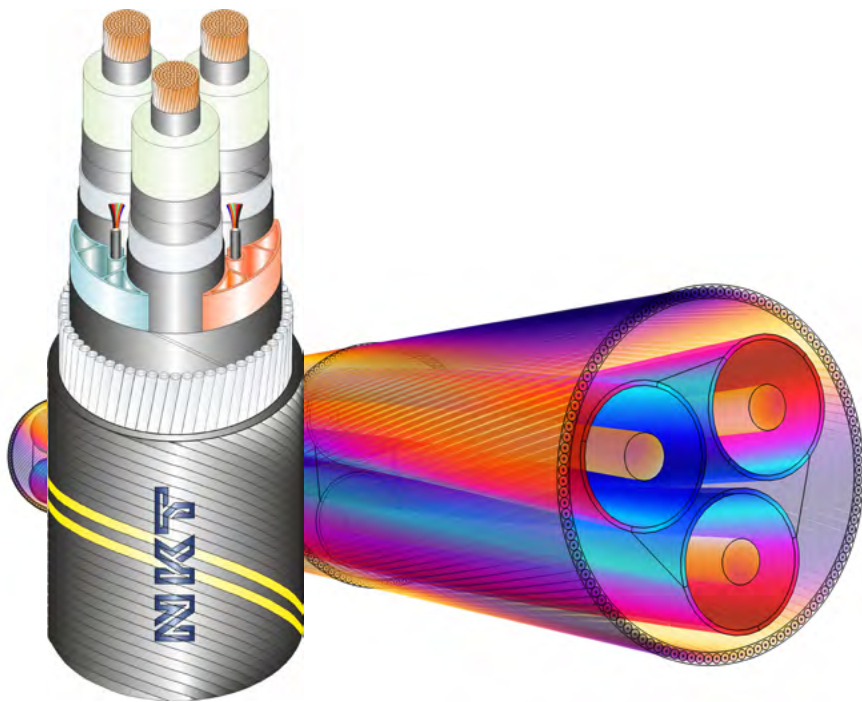


图 1 高压电缆连接了世界,但其维护成本昂贵并且难以分析。图片由 NKT 提供。

图 2 在 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件中建立的三维电缆模型。

全球线缆行业的市场价值高达数千亿美元。据 *Infinium Global Research* 报道,截至 2025 年,电缆市场规模有望达到 2200 亿美元(参考文献 1)。快速增长的电缆行业的主要收入来自电缆的安装、维护和开发。例如,连接挪威和荷兰电网的 NorNed 电缆项目,在 2008 年的安装成本约为 6 亿欧元(约 45 亿人民币,参考文献 2)。如果对这种规模的电缆进行维修或更换,费用将非常高昂。据 2010 年 SubOptic 海底电缆会议的一份报告估计,海底电缆的维修费用将超过每天 12000 美元,每个项目的维修费用将高达 100 万美元以上(参考文献 3)。电缆成本如此之高,需要很多年才能获得投资回报。

除了作为主要的投资项目,电缆还必须进行实验测试(图 1)。事实上,全球电缆供应商 NKT 公司对其所研究的电缆已经进行了多年的实验测试,这项工

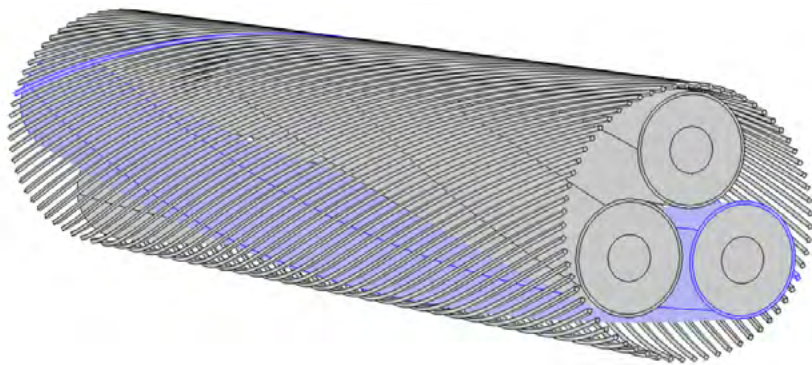


图3 三维电缆模型的几何结构,包含铠装海底电缆的基本特征:导体、屏蔽层和铠装。

作既费时又昂贵。“电缆损耗的测量是一件复杂的事情。”NKT的资深分析工程师 Ola Thyrvin 说道。

是否有解决这一问题的有效方法呢?位于瑞典卡尔斯克鲁纳(Karlskrona, Sweden)的NKT团队通过电磁场建模,对电缆设计进行了虚拟测试,将不同的电缆参数如何影响铠装损耗的过程可视化,并预测了不同安装条件下的电缆性能(图2)。由于电缆成本非常高,设计人员可以通过仿真方法分析电缆损耗,减少所需导体的尺寸,从而降低电缆成本。然而,他们需要完全确信所使用的建模工具能够满足他们的分析需求,并能获得准确的结果,因为电缆在被制造出来之前都无法进行测试。

### » 克服电缆建模中的局限性

目前,测试电缆设计时遇到的一个

问题是标准有些过时。事实上,电气与电子工程师协会(IEEE)和国际电工委员会(IEC)的一些电缆标准仍然使用的是基于80~100年前推导出的解析表达式,并对其进行了简化以便于手工计算。过去十年里,一些出版物中公布的测量结果表明,这些标准中的公式高估了电缆的铠装损耗。在某些情况下,实际的铠装损耗约为使用IEC标准计算的50%。由于电缆的最大载流量受导线允许的最大温度限制,因此减少损耗就有可能减少导体的尺寸。导体尺寸的减小意味着使用更少的铜或铝,这些铜和铝都较为昂贵,因此可以节省电缆项目的成本。

使用十年前开发的方法可以做到准确测量铠装损耗,但前提是电缆已经制造完成。几乎所有的高压海缆都是定制的,因此无法在产品出售和开始制造之前进行测试,需要在投标阶段就已经完

成电缆设计。随着数值分析的应用,对电缆和铠装线的研究变得更加容易,但仍有许多不足之处。从第一个三维电缆模型的创建到现在还不到十年。直到最近,在超级计算机上运行这类模型仍需要几天到几周的时间。但计算机硬件和建模技术的发展已经使电缆的设计和分析较之前变得更加快速、容易和可靠。过去需要使用超级计算机计算的电缆模型,现在在普通笔记本电脑上就可以运行,并且只需几分钟时间,而无需等待几天。这些技术的提升为NKT的研究带来了新的可能。

### » 建立三维铠装电缆模型

NKT公司的部分工作涉及电缆的电气仿真以及温度分布和相应损耗的计算。在铠装电缆中,很难计算磁钢铠装中的损耗,这是因为有源和无源导体之间存在复杂的相互作用,以及非线性材料具有磁滞特性和温度依赖性。此外,铠装电缆模型的几何形状(图3)包括一些非常细小的结构特征,例如铠装线之间的狭窄间隙。这会导致在建模中产生大量的网格单元、较长的计算时间和更大的内存需求。为了应对这些挑战,NKT着手研究他们是否可以在电缆模型中使用粗网格(图4),同时仍能准确描述钢材料(一种具有高磁导率和高磁滞损耗的强

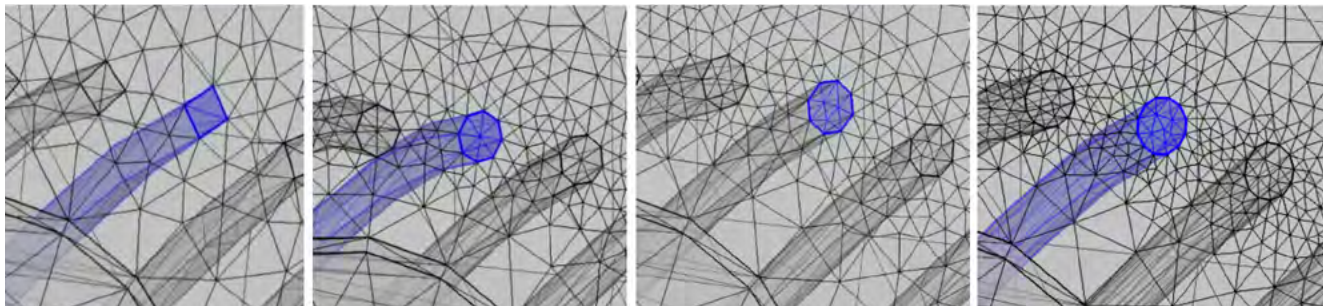


图4 电缆模型的不同精度的网格划分,从左到右每根铠装线截面内包含1~4层网格单元。

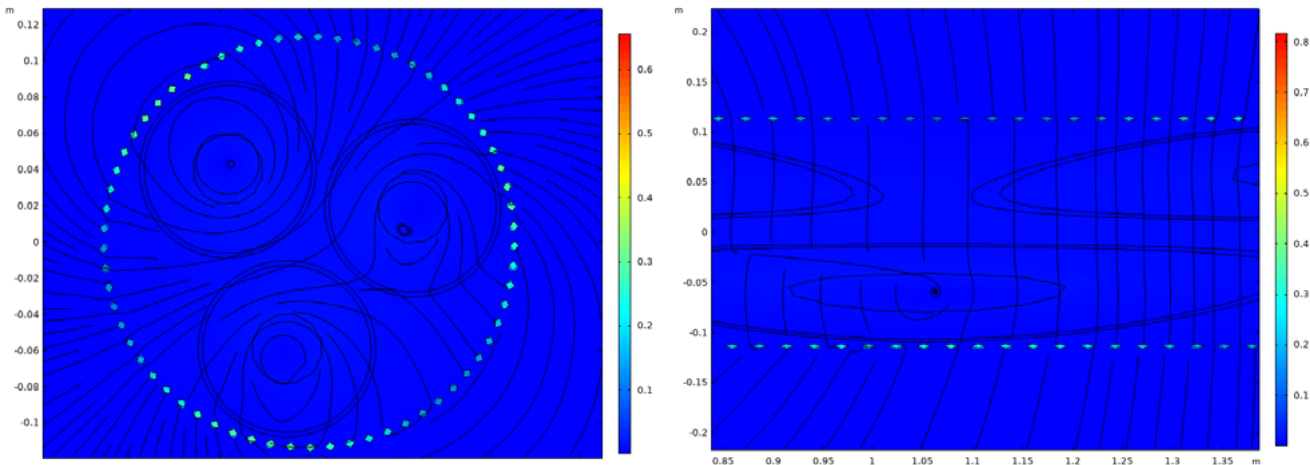


图 5 三维磁通量的可视化结果显示了在两种不同视图下磁场线如何通过电缆结构：截面图（左）和侧视图（右）。

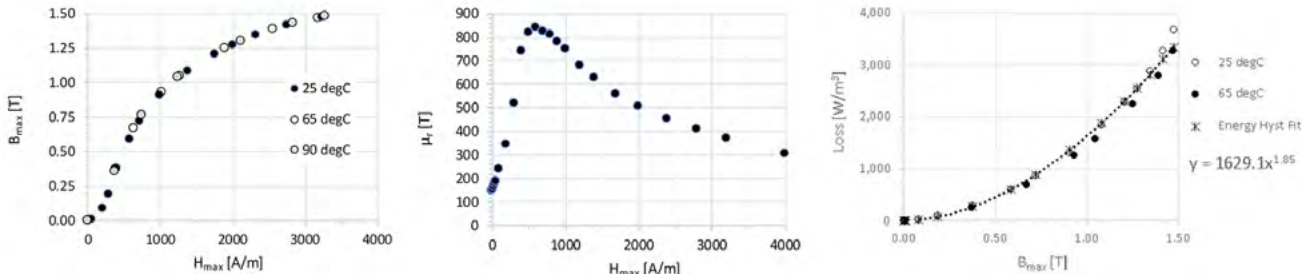


图 6 根据磁滞曲线计算的电缆磁性。

磁性软钢) 的非线性磁性行为。

团队选择了COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件, 以及其附加的特别适合电缆分析的 AC/DC 模块产品进行仿真研究。COMSOL® 软件支持对铠装电缆进行三维建模, 用于分析磁场并计算铠装损耗(图 5)。Ola Thyrvin 发现, COMSOL® 软件中的周期性边界条件对减少电缆模型的计算特别有用, 它允许研究团队只对一小段电缆进行建模, 并使模型尺寸尽可能小。减小模型尺寸有助于减少计算时间和所需的内存, 同时还能确保对所有相关物理场的正确捕获。“内层导线与外层铠装线的扭转角度不同, 需要对内层导线与外层铠装线两次扭转重合之间的一段电缆(二者周期的

最小公倍数)进行建模。”Thyrvin 说道。另一种节省内存的建模方法是使用无限单元, 它可以在模型中的电缆周围包含足够大的空气域, 从而减少使用的网格和内存。

### » 提升性能, 精准计算

NKT 团队的建模方法涉及三个主要阶段。首先, 他们建立了一个预设温度的电流驱动模型, 其中电流不受电缆阻抗或温度变化的影响, 而是由系统负载控制。接着, 该团队计算了涡流损失, 即在预设温度下由铠装线中流动的局部电流引起的损失。他们发现, 在导体附近的线段中, 损耗主要是由靠近相线附近的铠装线周围的屏蔽电流引起的。最后,

他们通过对铠装线的磁通密度进行体积分, 计算出了磁滞损耗(图 6)。

在 2019 年第十届绝缘电力电缆国际会议上发表的论文中(参考文献 4), NKT 介绍了在不显著降低准确性的前提下提高电缆性能的其他方法。首先, 他们发现, 即使没有考虑铠装中的集肤深度, 通过适当的几何校正因子和拟合的材料参数, 仍然可以计算出真实的损耗值。这通常比使用 IEC 标准计算得到的结果更接近实际情况, 并且大多数情况下, 计算值都在测量精度范围内。

此外, 在使用粗网格运行模型时, 他们使用了均匀的、真实的相对磁导率值。当只考虑铠装线中的平均磁场而非局部磁场时, 该数值与实验数据相匹配。因

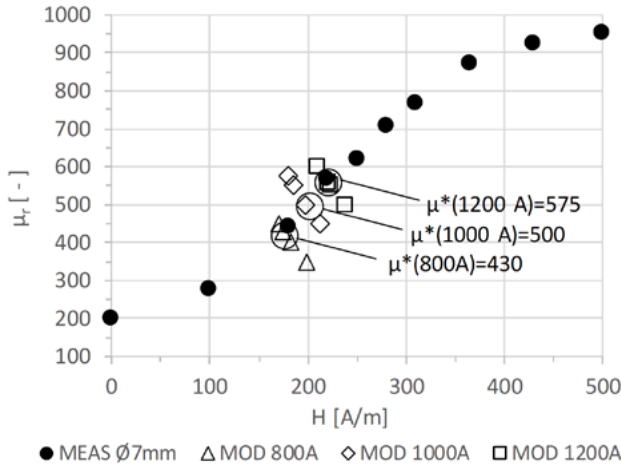


图7 电缆设计中三种不同电流下的磁导率模拟值  $\mu(H_{ave})$ ，以及实际测量的铠装线  $\mu$ -H 曲线。

此，磁导率不是非线性的或虚构的。在给定的电缆的特定工作条件下，磁导率被设定为铠装线平均磁场下的真实值，基于此即可在后处理步骤中计算损耗。这是因为从实验测量中他们能准确得知特定场强下的损耗。因此，在他们的模型中，磁滞损耗不需要再考虑电缆的电压或电流等电学特性的影响。

为了获得准确的相对磁导率，该团

队，较高的  $\mu$  值意味着铠装线的平均 H 值较低，反之亦然。最后，电缆工作点的准确有效磁导率值出现在模拟曲线与测量曲线的交点处（图 7）。

### » 电缆模型的结果验证

如果模型的结果不能准确地反映设备的真实物理特性，那么世界上所有的建模工作都没有意义。为确保电缆分析

队在不同工作电流下选取不同磁导率值 ( $\mu$ ) 进行了三维仿真。当使用粗网格时，他们计算出每个解的平均磁场 (H) 值，同时在计算中也考虑了铠装线横截面的减少。然后，将  $\mu$  值和 H 值绘制在测量的  $\mu_r(H)$  曲线上。研究团队发

现的模拟结果的准确，Thyrvin 和他的团队使用现有的电缆数据对其进行了验证。在计算电缆铠装损耗时，他们发现模拟结果与实验测量的电缆损耗误差小于 3%（图 8）。这个误差已经足够小了，比使用 IEC 标准计算的结果更准确。通常使用 IEC 标准计算的总损耗与测量值相差 10% ~ 30%。

### » 值得信赖的电缆分析

经过验证的三维电缆模型，使 NKT 相信仿真是进行电缆设计的一种可靠和可信的方法。这一认知对企业产生了深远的影响。基于之前的验证结果他们已经证实了数值模拟的准确性，因此，他们能够十分自信的对电缆设计进行研究，而不必每次都与测量值进行对比。Thyrvin 说道：“我们现在可以使用仿真代替测量，因为你可以在制作物理原型之前进行模拟，但不能在制造电缆之前进行测量。”现在，借助 COMSOL 多物理场仿真软件，NKT 可以基于仿真结果在制造电缆之前评估其损耗。◎

### 参考文献

1. “Wire and Cable Market (Type - Wire, and Cable ; Voltage Type - Low Voltage, Medium Voltage, and High and Extra High Voltage; Applications - Power Transmission and Distribution, Transport, Data Transmission, Infrastructure) : Global Industry Analysis, Trends, Size, Share and Forecasts to 2024”, Infinium Global Research, 2020.
2. M. Ardelean and P. Minnebo, “HVDC submarine power cables in the world”, Institute for Energy and Transport, pp. 50-51, 2017.
3. G. White, “Insurance and Risks in the Underground Cable World”, SubOptic, 2013.
4. D. Willen, C. Thidemann, et al., “Fast Modelling of Armour Losses in 3D Validated by Measurements”, 10th International Conference on Insulated Power Cables, C7-4, 2019.

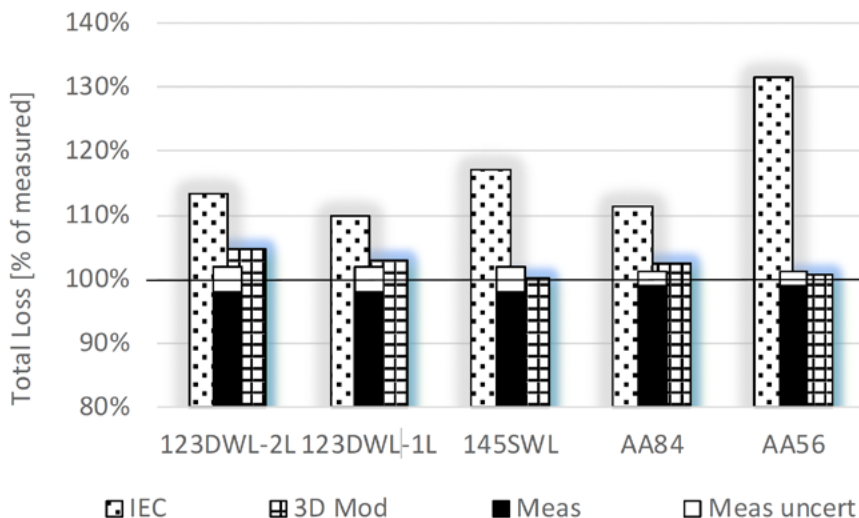


图8 IEC 的验证结果，五种电缆设计中损耗的测量值和模拟值。

Mahindra & Mahindra 公司, 印度

# 仿真 App 加速 汽车产品开发进程

Mahindra & Mahindra 公司的产品开发部门使用仿真 App 缩短了产品开发的周期, 同时促进了制造、设计和计算机辅助工程 (CAE) 团队之间的协作。2018 年, Mahindra & Mahindra 通过将仿真 App 应用到其产品开发流程中获益。近年来, 他们对仿真 App 的应用有了新的体验。

作者 ADITI KARANDIKAR

产品开发是一个具有时效性的过程。一些汽车公司, 如印度汽车行业的跨国原始设备制造商 Mahindra & Mahindra Limited (M&M), 正在不断寻找创新方法, 以缩短产品开发

的生命周期, 从而领先竞争对手。M&M 通过仿真减少了对原型制作的依赖, 大大缩短

了所有产品的上市时间。

然而, 即使加入仿真, 产品设计也可能会占用大量时间。设计人员需要快速评估新的设计概念, 但由于分析的复杂性, 这可能难以实现。计算机辅助工程 (CAE) 团队对设计进行评估后, 设计团队会根据 CAE 的评估结果修改设计, 并再次等待 CAE 专家的验证。这些迭代过程一直持续到确定最终设计。

因此, 根据设计最终确定所需的迭代次数, 某些车辆部件的设计周期可能会持续几个月。此外, 设计迭代之间的 CAE 分析十分耗时, CAE 专家需要在多个部门的设计中期评估之间反复权衡。



图 1 CAE 专家经常需要为多个项目进行重复的设计迭代。

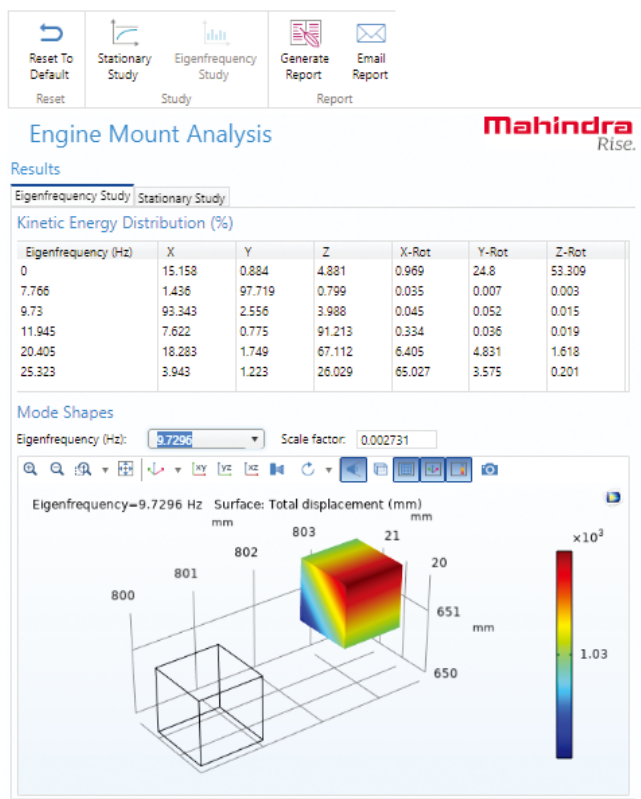


图2 参数化仿真 App 示例：发动机悬置分析仿真 App。图片由 M&M 提供。

COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件内置的“App 开发者”工具，使非专业人士也能利用仿真的强大功能，并帮助像 M&M 这样的公司减少这一瓶颈的限制。M&M 的方法开发团队开发了近 20 个仿真 App，并将其应用于不同领域的团队工作中，包括设计、测试，以及噪声、振动和声振粗糙度 (NVH) 分析。这些仿真 App 通过 COMSOL Server™ 和 COMSOL Compiler™ 被部署到公司各组织中。

这些仿真 App 使设计团队通过访问工程分析工具，从设计初期就能够积极参与新设计的概念验证，从而更有效地与 CAE 专家合作。反过来，这又可以最大限度地减少实现稳健设计所需的迭代次数，并为 CAE 团队节省时间来处理更多其他项目。

## » 仿真 App 的优势

M&M 团队发现，使用仿真 App 使概念评估和确定最终设计变得更加容易。通过仿真 App，设计人员可以亲自尝试各

种设计，并根据设定的标准客观地对它们进行评估。仿真 App 的参数化特性为快速评估不同设计提供了便利性和灵活性，与详细的三维分析相比，其周转时间更短。

当设计处于概念阶段时，仿真 App 尤其有用，因为它对 CAD 结构的要求不高。早些时候，该过程受到 CAD 团队设计稿交付时间的限制，进一步增加了设计周期。随着仿真 App 的引入，CAE 团队可以更快地开始设计评估。当 CAD 结构的一些细节还无法确定时，仿真 App 就可以发挥作用，用于评估不同的设计方案，而仅入选的设计方案才会被用于后续的 CAD 工作。

例如，在使用底盘概念设计仿真 App 的过程中，用户可以在执行 NVH 分析时更快地评估关键指标，例如振动的基频、弯曲和扭转刚度。用户无需手动添加边界条件和网格，因为该仿真 App 会自动执行此操作。这样在相同的设计周期中，就能评估更多的概念设计。

另一个重要方面是概念设计的可视化。在早期的设计过程中，设计人员使用耗时的工具，或者依赖其他团队来观察他们的更改对后续设计的影响，这使得提出直观的修改意见变得更加困难。通过使用仿真 App，设计人员能

够直观地看到不同的设计，以及关键参数对最终设计的影响。由此，M&M 的团队能够对设计概念的可行性做出更明智的决定。在平衡杆仿真 App 中，这一优势尤为显著，设计人员可以进行简化的模态分析，快速评估各种设计概念。

仿真 App 的用户界面友好，使用简单、方便。通过 COMSOL Server™ 产品，用户可以在计算机的网页浏览器上直接访问和运行这些仿真 App，M&M 的各个相关团队都可以便捷地访问设计过程。此外，通过内置的报告功能进行结果的后处理和共享，可以使跨团队协作变得更加容易。

通过 COMSOL Compiler™ 产品，用户可以将这些仿真 App 转换为独立的可执行文件，进一步提升应用程序的可用性，使更多用户能够在没有 COMSOL Multiphysics® 或 COMSOL Server™ 许可证的情况下依然可以运行仿真。

## » 简化产品开发流程

在设计过程中使用仿真 App 的最大益处是，M&M 团队大幅减少了设计最终确定前的迭代次数。因为仿真 App 的使用让设计在早期就能够与预期的结果非常接近。设计评估工作前置意味着，当设计稿被递交给 CAE 团队

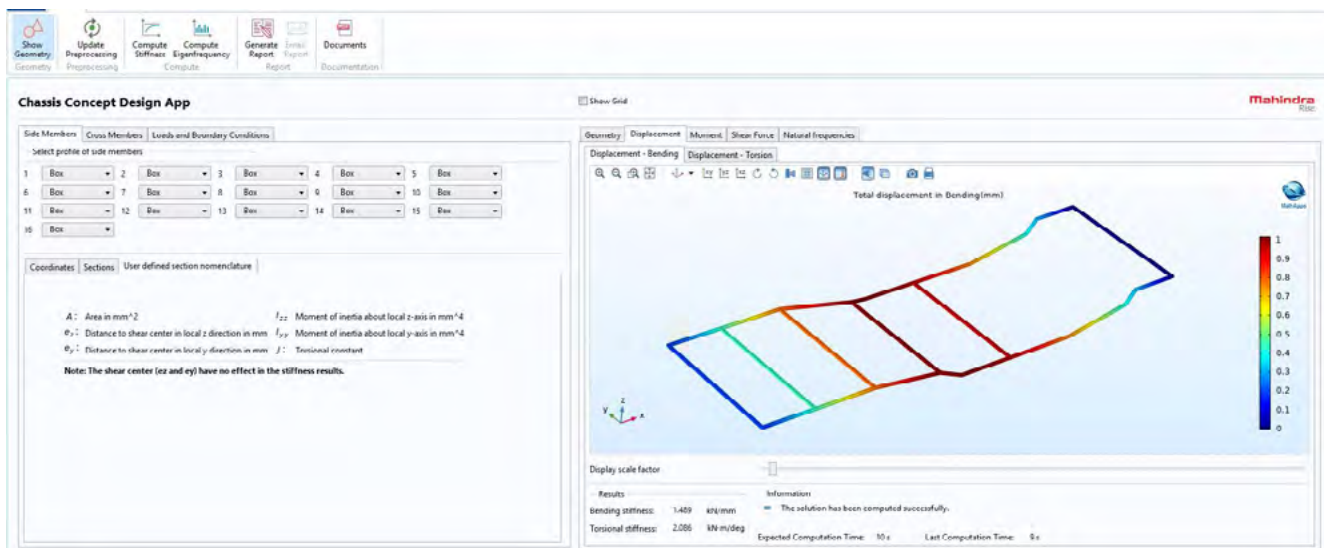


图 3 底盘概念设计仿真 App。图片由 M&M 提供。

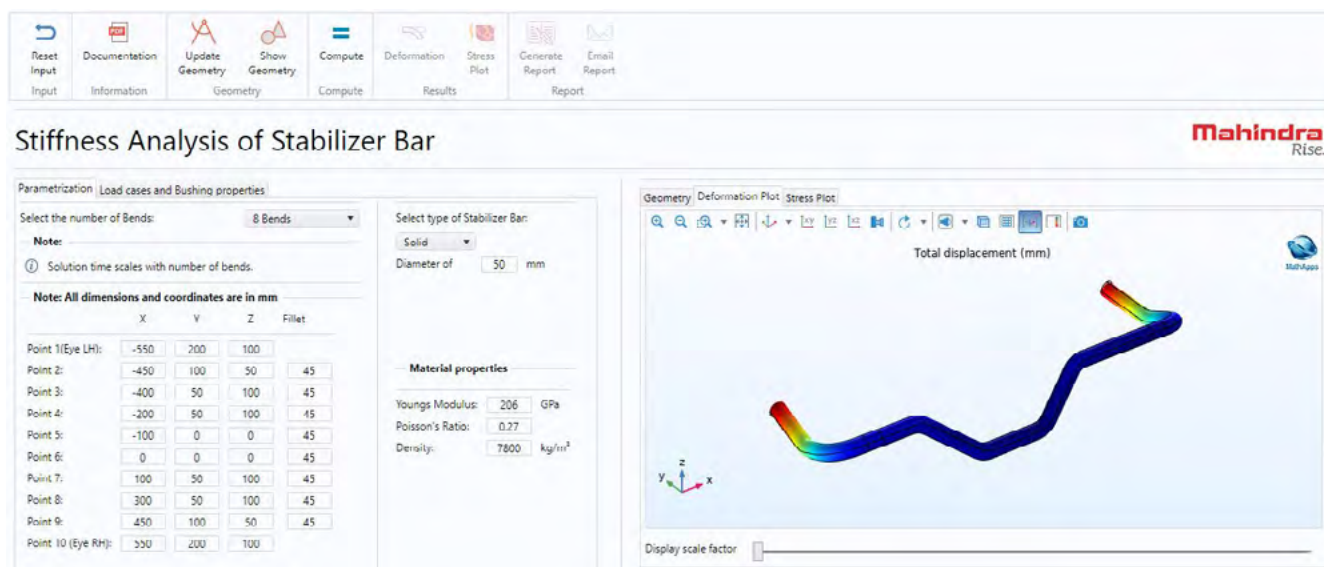


图 4 用于模态分析的平衡杆仿真 App。图片由 M&M 提供。

进行最终确认时,这已经是满足最低要求的更成熟的设计了。即使是关键项目,例如目标组件的轻量化设计,也可以由设计团队从概念阶段就开始驱动。

过程的优化产生了更多的概念设计,这反过来又会加快设计的最终确定,从而最终节省时间和成本。现在,设计团队通过使用仿真 App 评估提案设计,能够为即将到来的和正在进行的项目创建新颖的设计,为 M&M 各个团队带来更多的创新方法。

### » 未来计划

通过使用仿真 App, M&M 能够在整个组织内真正实现仿真大众化。随着仿真 App 成功被用于各种客运车组件的设计, M&M 团队计划在未来几年继续保持这一趋势。他们计划在现有

仿真 App 中加入更多载荷工况和指标,以优化概念设计评估。更加新颖和严格的设计目标将被加入仿真 App 中,由此产生的设计将更加接近最终预期。同时,相关优化参数的引入也将进一步增强这些仿真 App 的功能。☺



thermofin 公司, 德国

# 优化用于制冷技术的 换热器设计

热交换技术常被应用于各种场景, 包括为室内滑雪场降温, 为著名的古堡提供空调系统, 以及冷却和冷冻生活用品。为了确保产品设计能满足客户的各种需求, thermofin 公司通过多物理场仿真对换热器设计进行了优化, 并提升了其性能。

作者 RACHEL KEATLEY



图 1 thermofin® 换热器被用于各种设备中, 如速冻柜、混合冷凝器和气体冷却器。

据估计, 2018 年仅在美国就有超过 1 亿吨食物被浪费, 这个数字超过了 60 万头普通蓝鲸的重量(参考文献 1)。绝大多数食物垃圾最终将进入垃圾填埋场被分解并产生甲烷。据美国食品和药物管理局(FDA)报道, 垃圾填埋场中食物垃圾的占比最大(参考文献 2)。食物在其使用过程中的任何阶段都可能被浪费, 因此对于消费者和食品行业而言, 了解如何减少食物浪费非常重要。在工业层面, 确保消费品在被消耗前得到妥善的储存是减少食物浪费的一种解决方案。

德国德默菲换热器有限责任公司(thermofin GmbH)是世界领先的换热器制造商, 它通过优化换热器设计, 帮助解决了上述问题。thermofin 公司的换热器被应用在世界各地的商业和工业建筑的空调和制冷系统中, 如在超市、冷藏室、冰场和发电厂等场所均能看到他们的设备。为了确保他们的设计

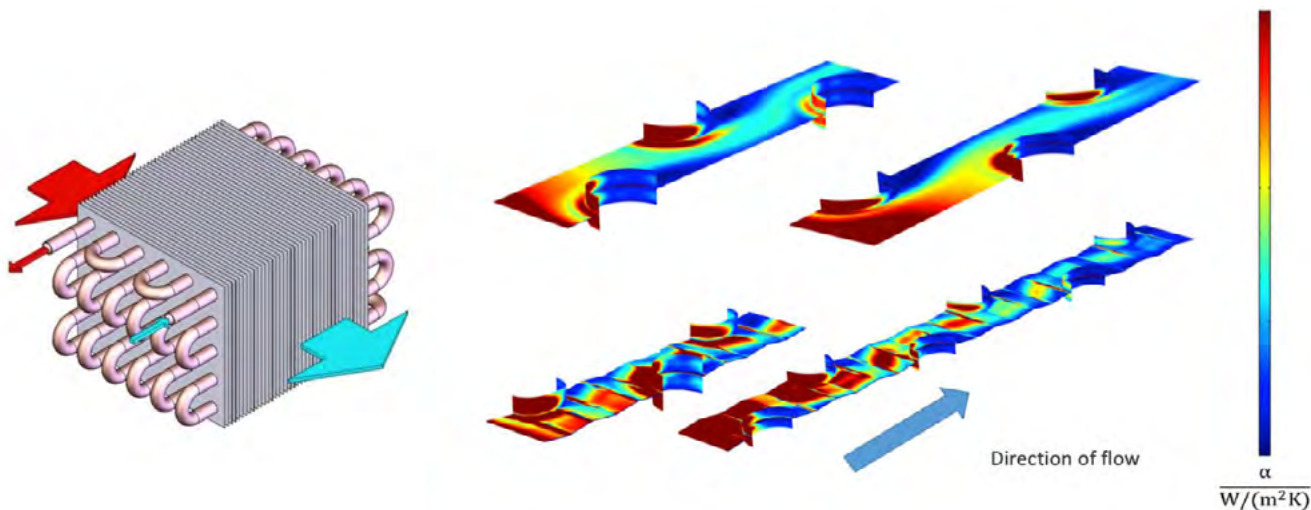


图 2 左图：thermofin® 换热器的几何结构。大箭头表示气流方向，小箭头表示制冷剂流动方向。此外，红色和蓝色表示温度的变化。例如，气流在入口处是热的（红色），在出口处是冷的（蓝色）。右图：thermofin® 换热器包含具有不同材料性能和间距要求的板条或翅片。为了更好地理解这些板条是如何工作的，thermofin 公司使用仿真对气流方向进行分析。图注：Direction of flow – 流动方向

能够满足一些特殊的用途和客户需求，thermofin 公司的热力学开发工程师 Julius Heik 对换热器设计进行了仿真优化。

在进行仿真工作的过程中，Heik 最喜欢的部分是在进行实际测量之前，他就可以提前了解产品的相关性能。

## » 换热器的优化设计

自 2002 年成立以来，thermofin 公司从最初的 6 名员工已经发展到 500 多人，并在全球几个大洲建立了多个生产基地。他们生产的热交换器性能可靠，在制冷和空调行业中备受欢迎。

换热器的设计原理看似简单，实际上相当具有挑战性。在冷却产品的过程中，关键的任务是利用制冷剂的循环制冷除去多余的热量，从而将热能从易腐产品中提取出来。通过将制冷剂从液相转变为气相，换热器从周围环境中吸取热量。接着，这些热量被传递到另一个换热器中，最终被释放到外部环境。

在二氧化碳的跨临界制冷循环中，换热器内的制冷剂通过所谓的“气体冷却器”被冷却。通常，人们会被气体冷却器这个名字迷惑，认为它是通过气体冷却周围的环境。Heik 表示，设计普通的换热器，特别是气体冷却器，存在很多困难。在追求更好、更节能的制冷循环过程中，精心设计过的换热器发挥着重要作用。

和许多冷却系统一样，气体冷却器使用对环境产生的直接影响最小的天然制冷剂二氧化碳。在超市制冷系统中，现在几乎全部使用二氧化碳，因为它已被归类为无害气体（安全组 A1）。然而，由于二氧化碳的特性，当空气温度超过 20 ~ 25 °C 时，它必须散热。这个温度范围也被称作跨临界温度范围。这也导致了这些系统由许多不同的电路和各种各样的材料组成，并且存在很大的温差。通过多物理场仿真，Heik 能够高效地分析空气流动和这些设备的材料特性。

在开发换热器时，设计内翅片管是

另一个巨大的挑战。这些翅片管用于将热流体转化为冷流体，或者将冷流体转化为热流体。翅片管的排列、直径、材料（如果使用氨气则需要不锈钢）和翅片间距均取决于它们所应用的换热器类型。“关于这些翅片管是如何工作的，我们缺乏足够的测量数据。” Heik 说道。借助仿真，他可以模拟多个翅片管的几何结构，研究它们的内外传热能力，从而更好地理解翅片管如何影响换热器的设计。他们在内部实验室对通过仿真分析得到的高性能翅片管进行了原型制作和测试。Heik 说：“我们查看计算结果和试验结果是否一致或近似，然后选择性能最优的翅片管用于我们的工业生产线。”

## » 冷藏室模拟

除了模拟换热器，thermofin 公司还通过多物理场仿真的方法模拟客户的冷藏室。在一个特定项目中，一位客户需要一个包括多个存储设备的肉类冷藏

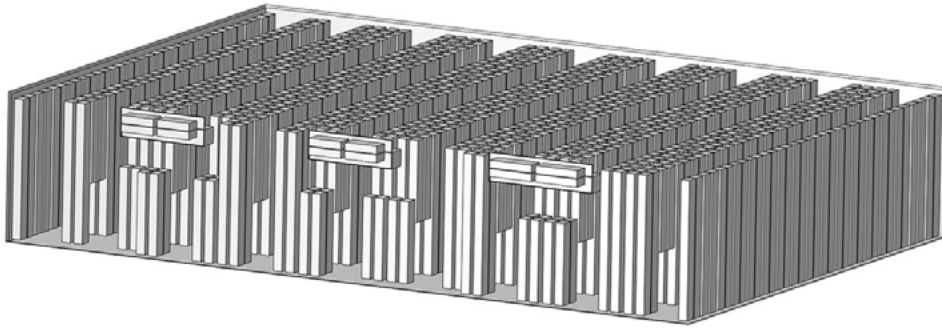


图 3 冷藏室的几何模型。由于冷湖效应，冷空气被引向地板后因密度差异发生扩散，在房间的另一端上升后，在屋顶被回收。该模型考虑了具有叉车通道的高密度储物架。

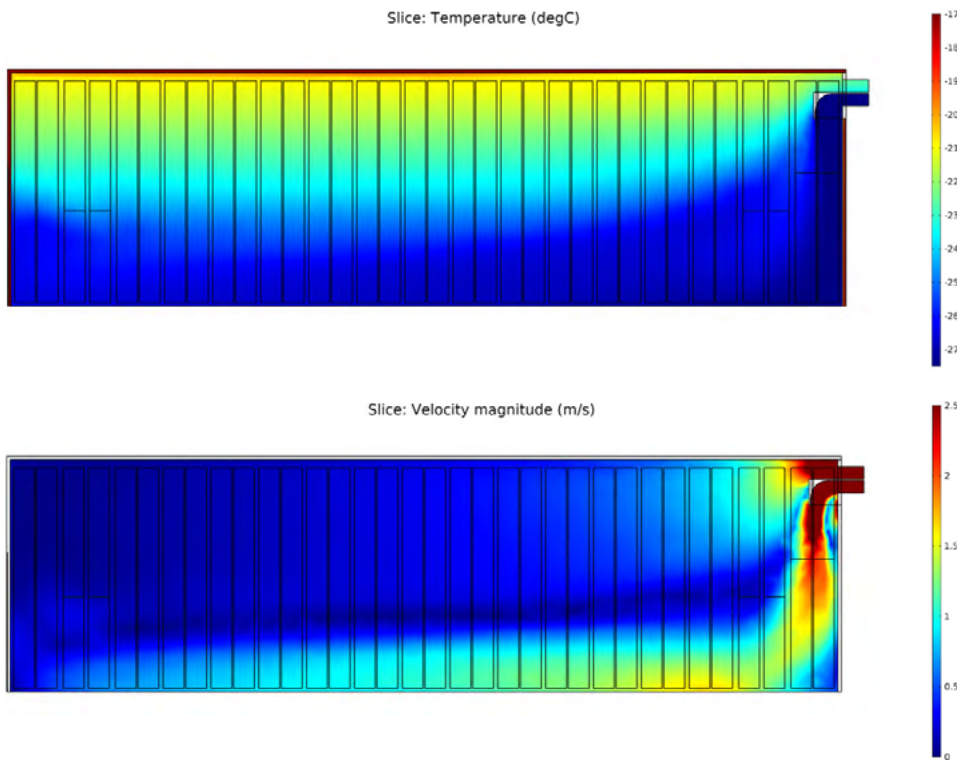


图 4 冷藏室的温度分布（上）和气流速度分布（下）仿真结果。图注：Slice – 切面图；Temperature – 温度；Velocity magnitude – 速度大小

室。肉类在室温下被带进冷藏室，冷却后才能进入另一个冷藏室。Heik 解释：“房间内的空气流速不能太高，否则肉就会从机器上被吹下来，这一点很重要。另外，房间里每个区域空气的均匀分布也非常重要。”

对类似的冷藏室进行模拟时，需要考虑几个标准，包括温度分布、气流分布、相对湿度，相邻热负荷以及自然对流。起初，thermofin 公司认为他们的客户需要 5 台换热器，才能保证冷藏

室内的空气均匀分布。

在模拟了一个包含 5 台换热器的冷藏室后，Heik 发现回流的部分空气会绕过中间的天花板。为了解决这个问题，他在室内模拟了一些空气导流管。这些导流管有助于确保平稳的回流，最终减少了室内的漩涡数量。根据 thermofin 的建议，客户最终采用了 5 台 thermofin® 公司的设备，并建造了带有空气导流管的冷藏室。客户对最终的设计效果非常满意，肉也没有从机器上掉下来过。

## » 未来计划

随着 thermofin 公司在全球市场的持续增长，他们的创新性仿真工作计划也在不断发展。Heik 说：“在未来的研究计划中，我们希望设计一种含新的翅片形状的换热器，这需要增大换热器管的直径。”为了成功实现这个计划，thermofin 公司首先需要找到最优的方法来分隔这些管子。“对于新的翅片结构，我们必须先进行模拟，然后再制作原型。这样的改进有助于提升所设计的换热器的传热能力。” Heik 说道。◎

## 参考文献

1. “2018 Wasted Food Report”, United States Environmental Protection Agency, 2020.
2. “Food Loss and Waste”, United States Food and Drug Administration, 2020.

TL-Engineering 公司, 丹麦

# 绿化城市中心： 花园式城市屋顶排水系统设计

在丹麦的哥本哈根市,美丽的柳木栅栏内隐藏着一个用于分散附近公寓楼屋顶雨水的可持续城市排水系统。通过协作式仿真驱动的设计过程,这项基础设施已经成为一道美丽的城市风景,不仅可以保护街区花园、减轻噪声污染,而且有助于防止频繁的降雨淹没城市排水系统。

作者 ALAN PETRILLO

“城市中的绿色植被非常宝贵,但它们也经常处于压力之下。我们不仅需要这些经常被忽视的小块土地帮助管理空气质量、噪声污染和排水系统,甚至还希望它们成为自然美景和宁静的绿洲。”哥本哈根大学(University of Copenhagen)景观建筑与规划教授 Marina Bergen Jensen 介绍道。为了充分利用城市中这个重要的空间, Jensen 教授带领团队开发了

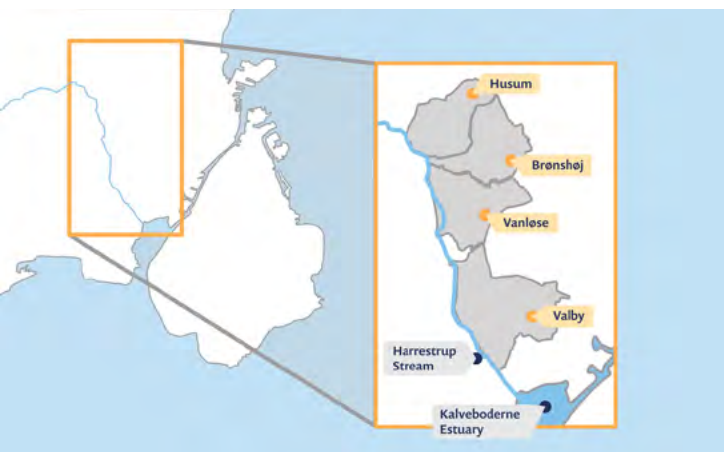
一种新型基础设施:一个被木板覆盖的“绿色屏障”。该设施提供了一个巧妙的系统以分散来自附近屋顶径流的雨水,用于保护和改善哥本哈根人口密集在社区环境。

如同城市本身一样,城市中的绿色屏障是一个多要素的迷人组合,它们聚集在一起提供多种用途。如同城市生活一样,城市中的绿色屏障是由不同人和组织共同参与创造的,他们都为最终的项目贡献了各自独特的才能。由工程师、建筑师和公民利益相关者组成的团队在 Jensen 教授的指导下共同工作,他们提出的更宜居、可持续的城市愿景让社区中的每个人都能从中受益,人们可以与建筑物、汽车和基础设施共享宝贵的生存空间。

## » 城市生活的整体人类视角

令人感到意外的是, Jensen 教授的博士研究方向并不是建筑学或城市规划。“我之前研究的是土壤科学和水化学,以及土壤、水、植物和微生物之间的相互作用。”她说道,“但是,现在在我的研究领域已经转向城市,我和规划师及景观设计师们一起工作。我的职业是建立在城市生活的整体人类视角之上的。”

在哥本哈根(图1),这一视角必须包含高度开发的环境中的频繁降雨。大多数城市雨水会落在屋顶、街道和不透水的“人造景观”表面,而不是渗入土壤。这些雨水通常由雨水道收集,



**图 1** 丹麦鸟瞰图。插图表示一个包含约 100000 名居民的区域,该地区的雨水径流每年会导致大约 200 次混合污水溢流进入 Harrestrup 溪流,然后流入 Kalveboderne 河口,最终汇入大海。

注: Husum, Brønshøj, Vanløse, Valby 均为丹麦地名, Harrestrup, Kalveboderne 为哥本哈根地区的河流名称。

这意味着有暴雨时,雨水会溢出污水处理系统,雨水和污水的混合物甚至会淹没城市街道。为了更好地管理这些风险,Jensen 教授和她的同事致力于开发一个可持续的城市排水系统。

“据估计,哥本哈根的所有雨水径流中至少有 50% 来自屋顶。大部分雨水都被排入城市下水道,但并非只能如此。” Jensen 教授解释说,“我们应该有可能模仿大自然的循环过程,让更多的水渗入地下或者蒸发。”

### » 将雨水从一个屋顶输送到另一个屋顶

作为政府资助计划的一部分,一个多学科团队在 2013 年为密集的哥本哈根社区开发了一个为期 5 年的可持续城市排水系统计划。他们提出了一种经由屋檐沟与雨水管收集雨水的解决方案。与传统的城市排水系统不同,新的排水系统不是向下流入下水道,而是利用重力将雨水输送到一个独立墙壁结构的顶部(图 2)。也就是说,水从建筑物的屋顶流出,然后被存储在不同结构的顶部。为什么要这样设计呢?

建立这个反直觉过程的目的是蒸发。正如水坑中的水最终会干涸一样,通过该系统的大部分水也会蒸发(图 3)。城市绿化屏障结构就像一个垂直的水坑,将水保持在地面上然后蒸发。

雨水在重力的作用下被推到屏障结构顶部后,会沿着一个开放的多孔排水沟流动。一部分水会向下流入屏障主体,并被纤维状矿物棉块吸收。这种岩石基质材料在北欧国家通常被用作保温隔热材料。在城市绿化屏障中,它起到海绵的作用,用于吸收来自屋顶的水,并将它们逐渐释放到空气中。如果矿物棉块被大

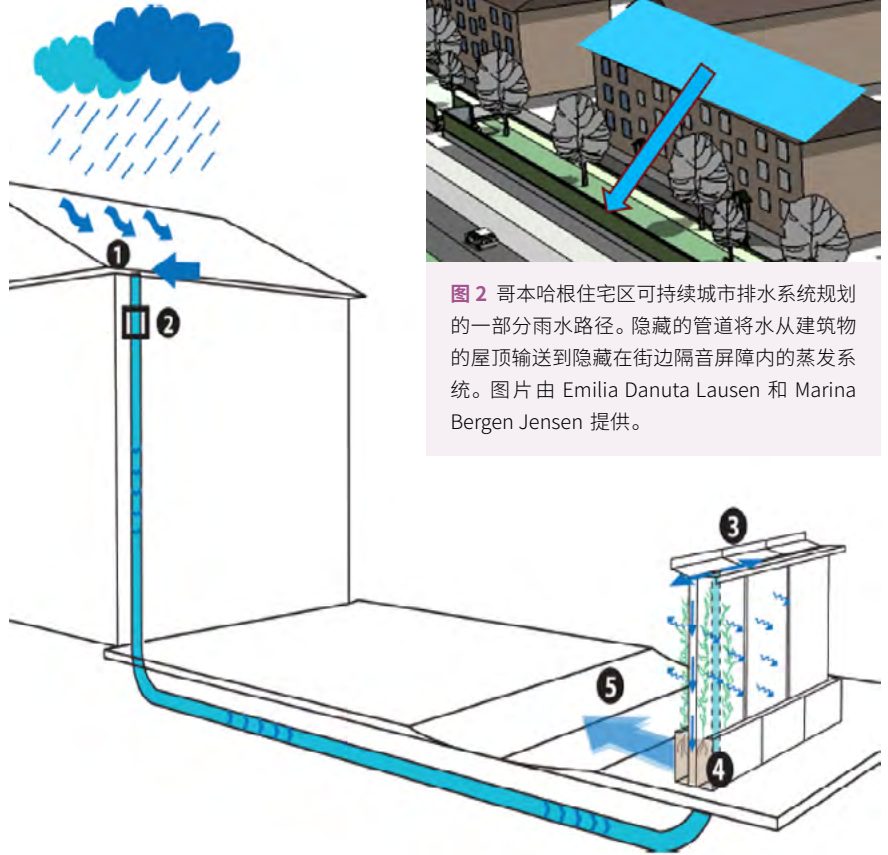


图 2 哥本哈根住宅区可持续城市排水系统规划的一部分雨水路径。隐藏的管道将水从建筑物的屋顶输送到隐藏在街边隔音屏障内的蒸发系统。图片由 Emilia Danuta Lausen 和 Marina Bergen Jensen 提供。

图 3 城市绿化屏障的雨水分散系统示意图。屋顶径流在重力的作用下被推入屏障结构的顶部,然后沿着多孔排水沟流动。雨水从排水沟排入吸收性矿物棉块,然后被蒸发到空气中。图片由哥本哈根大学提供。

雨完全浸透,多余的水将从结构底部释放,并被收集在一个土壤填充区,用于灌溉藤本植物和其他装饰性植物。制定种植计划是为了确保绿色植被能够茂盛生长,以支持生物多样性(例如吸引昆虫和鸟类)。

“使用这种结构是为了分散尽可能多的水,并占用尽可能少的空间。”土木工程师 Kristoffer Ubak 解释道。他的研究方向是水管理,帮助指导城市绿色屏障项目。“我们还认为,这不仅仅是水问题的解决方案。它还充当了隔音屏障,并有可能会吸收道路上的颗粒污染物。”他介绍说。此外,植物的蒸腾作用还能减轻“城市热岛效应”的影响,而这种效应



图 4 丹麦高速公路旁的 Pilebyg 隔音屏障。

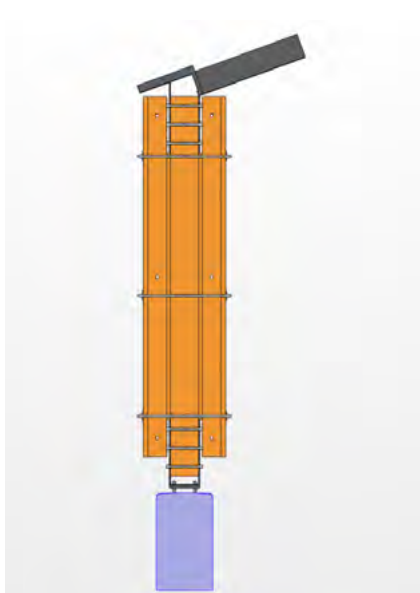
是导致城市通常比周围的乡村要热得多的主要原因。

### » 栅栏,而不是墙: 睦邻城市分区的需求

除了满足这些功能需求外,设计团队还必须考虑 Jensen 教授所描述的



**图 5** 城市绿色屏障的最终设计图。钢底座和结构框架支撑了柳木覆盖的矿物棉块和屋顶/檐沟组件。图片由 TL-Engineering 提供。



**图 6** 城市绿色屏障模型的几何结构。图片由 TL-Engineering 提供。

“整体人类视角”。充满缓慢蒸发水的高大实心墙可能会有助于排水，但它在人们的前院并不受欢迎。“我们在项目初期就曾与居民会谈过，” Jensen 教授解释说，“有些居民担心‘实心墙屏障’会让他们的社区感觉像一座监狱。”

居民的担忧提醒人们，社区的“家具”必须起到建筑的作用，而不仅仅是基础设施，这就是城市绿色屏障的钢架和矿物棉块大多被隐藏的原因。它看起来

像一个木栅栏，而不是金属和砖石墙，屏障内还配备了长椅和草地植被。透过屏障中的两扇窗户可以看到街道，而屏障两端的窗户可以为行人提供安全保障，方便他们在经过时可以看到拐角处的情况。实现这种既满足水管理目标又兼具美观和结构合理性的设计，对项目团队来说是一项挑战。

“我是一名土木工程师，” Ulbak 说道，“我懂得很多关于如何蒸发水的知识，但我们必须解决其他问题。开会时，有人提出：‘你能不能只搭一面玻璃墙？’他们担心看不到街道，但项目的关键点是制作一堵可以分散水的墙，而玻璃不能蒸发大量的水。”他解释道，“这只是我们遇到的其中一些阻碍，向前迈出的每一步都可能需要数月的时间才能找到更好的解决方案。”

### » 隐藏排水系统的“柳楼”

这时，结构咨询工程师和仿真专家 Tim Larsen 加入了该项目，他在基础设施项目方面的技能和经验帮助团队解决了绿色屏障遇到的多重挑战。“在我加入这个项目前，团队已经提出了很多想法。他们向我展示的一些设计建筑图纸中，有些结构遇到刮风就无法站立。”Larsen 回忆道，“我提出了一个使用完整钢结构方案，但却告知社区不能接受。这时，我建议联系 Pilebyg 公司。”

Pilebyg 的名字结合了丹麦语中的“柳木”和“建筑”，30 多年来，他们一直在用柳树建造新颖的结构。建造过程包括培育柳树，使其树干长成相对均匀的弯曲形状，然后将收获的树干编织在由钢或其他类型木材制成的支撑框架周围（图 4）。特殊处理过的柳木覆层能够持续使用数十年，既能保护结构又帮助

完善景观。“你不会因为树太老而觉得它丑陋。” Pilebyg 的股东兼项目经理 Vibe Gro 说道，“我们提供了一个可以美丽地衰老的外观。”

### » 仿真支持设计和建造过程

Pilebyg 隔音屏障已经成为丹麦高速公路沿线的常见景观，但该公司之前从未建造过隐藏排水 / 蒸发系统的栅栏。为了帮助实现将多种材料及功能组合成一个坚固且协调的结构，获得土木工程硕士学位的 Tim Larsen，使用 COMSOL Multiphysics® 软件进行了模拟分析（图 5）。

“这很有意思，因为 Tim 在项目启动初期并未参与进来，但他的工作对于我们达成可行的解决方案至关重要。” Ulbak 解释道。他将仿真的作用比作查看制作一套玩具的说明。借助仿真，项目利益相关者能够查看模拟结果，并说明他们的项目是如何被组合在一起的。

Tim Larsen 使用仿真来确保他们设计的结构足够坚固以适应哥本哈根的气候（图 6 ~ 图 7）。结构分析有助于验证结构能够承受风压、水流经多孔介质外部以及水浸透矿物棉芯时所产生的变化载荷。

这种结构包含多种材料，因此即使微小的变化也会产生很大的影响。“顶部的一点悬垂看起来并不多，但是当它充满水时，会产生一个沉重的弯曲力矩，尤其是在有风的时候。” Larsen 解释道。

随着项目临近竣工，团队可以将使用 COMSOL® 软件获得的模型结果图分享给其他利益相关者，也可以提供给建造该结构的工作人员，帮助他们向项目资助者解释项目的运行原理。“仿真是一种分析工具，同时也支持我们进行设

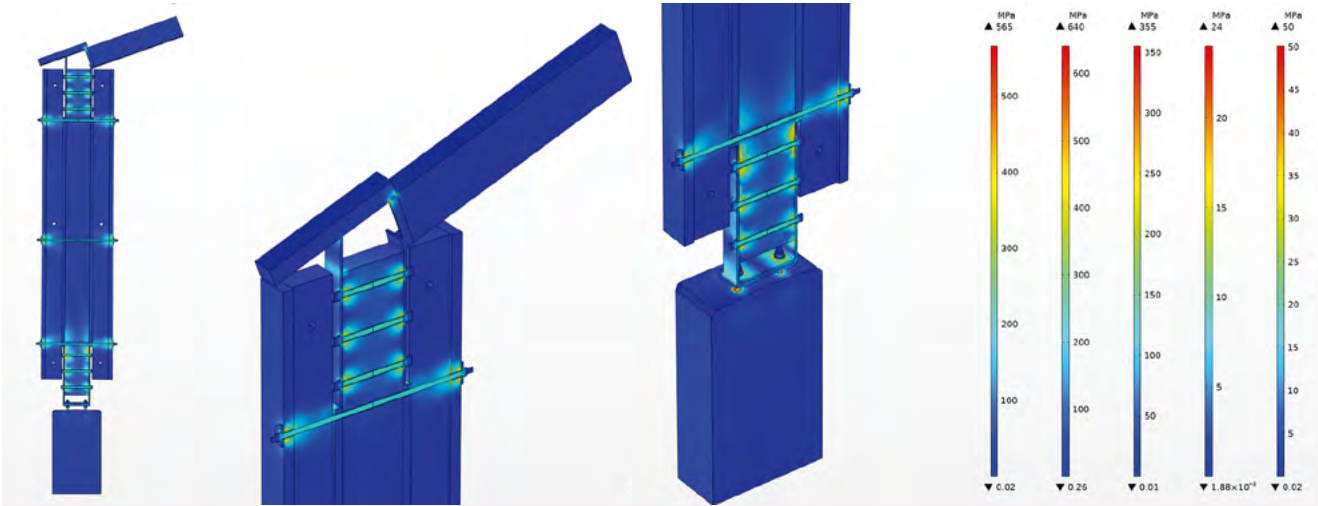


图 7 城市屏障的应力分析结果。模型图片由 TL-Engineering 提供。



图 8 2019 年 (左) 和 2020 年 (右) 完成的城市绿色屏障的一部分。垂直玻璃窗和建筑物之间出现的原生植物正蓬勃生长。

计讨论。现在, 它还帮助我们推广建筑理念。” Kristoffer Ubak 说道。

### » 为发展更多绿色屏障播种

经过大约 6 年的发展, 城市绿色屏障于 2019 年在哥本哈根安装完成 (图 8)。这些结构满足了为其设计做出贡献的每个人的需求, 包括那些更喜欢由玻璃制成的屏障的人。一系列垂直窗为柳树覆盖的表面提供了视觉上的隔断效果, 还为保障社区安全增加了“街道上的眼睛”。

目前, 该结构已经成功为居民分散了雨水并降低了交通噪声 (图 9)。“当你从街道走到屏障的住宅一侧时, 就像进入了天堂。” Jensen 教授说道。尽管

新冠肺炎的全球大流行和其他因素使得详细研究该设施的尝试变得复杂, 但各利益相关者的反应是积极的。为了能够从学术观点加以阐释, Jensen 教授希望在宣布该项目成功之前做更多的研究。

“我们认为栅栏住宅一侧的空气质量更好, 蒸发冷却应该有助于减少‘城市热岛效应’, 我们需要更多的测试来证实这一点。” 她说道, “还有认知问题, 我们想跟踪调查人们如何使用这个空间, 并采访每天与该设施一起生活的居民。”

尽管该项目正在等待进一步推进, 但已经有一些有力的证据表明绿色屏障被接受了: 它不会吸引涂鸦。Pilebyg 公司的 Vibe Gro 对此并不感到惊讶。



图 9 已完成的屏障结构的俯视图和城市绿色屏障的街景。

“我们的建筑物通常位于易遭受破坏的区域, 但人们在树木周围的行为似乎有所不同, 即使它们属于建筑物的一部分。” Gro 说道, “我们的雨水解决方案不仅可以解决噪声问题, 还提供了一种让人感觉舒适的结构, 就像丹麦谚语中所说的‘一掌打死两只苍蝇!’”

MicroPort CRM 公司, 法国

# 无导线心脏起搏器的体内通信

无导线心脏起搏器已经成为心律管理的前沿技术。MicroPort CRM 公司使用数值仿真对多节点无导线心脏起搏器系统之间的通信进行了优化。

作者 DIXITA PATEL

起搏器技术的进步, 包括改进的电子器件和更小的电池尺寸, 使得开发无导线心脏起搏器 (leadless cardiac pacemakers) 成为可能。无导线心脏起搏器是一种自给自足的 (胶囊状) 发电机和电极系统, 它避免了使用口袋或常会导致故障的经静脉引线。目前, 市场上的无导线心脏起搏器只在心脏的一个位置运行。对于需要多腔刺激的患者, 可以使用多节点无导线心脏起搏器系统 (图 1), 这种系统需要所有植入设备之间同步才能正常工作。然而, 由于功耗和尺寸的限制, 目前所使用的标准通信技术可能并不合适。

为了使无导线心脏起搏器系统及其体内通信更加高效, MicroPort CRM 公司的研究人员正在使用数值仿真技术研究电流耦合型人体内通信 (galvanic intrabody communication, IBC) 以应对这些设计挑战。IBC 提供了一个功率优化的解决方案来促进器件之间的通

信, 这有助于同步多节点无导线心脏起搏器系统。

## » 用于无导线心脏起搏器的 IBC

IBC 是一种近场通信方法, 它使用一个电极对经身体组织向接收信号的第二个电极对发送脉冲。这种方法的功耗极低, 而且不需要额外的天线, 因为用于起搏的电极也为通信提供了电场。

Mirko Maldari 是 MicroPort CRM 公司的一名电子工程师, 为了进一步表征这类通信信道, 他和他的团队提出了一种新的方法。Maldari 说: “在 IBC 中, 由于使用电极 (而不是线圈和天线) 进行通信, 我们可以同时优化其功耗和尺寸。他们对分别植入右心房和右心室的, 由两个胶囊组成的系统进行了体内研究 (图 1 ~ 图 2)。在进一步的分析中, 他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件来测量信道的衰减, 并估算组织中的功率损耗。

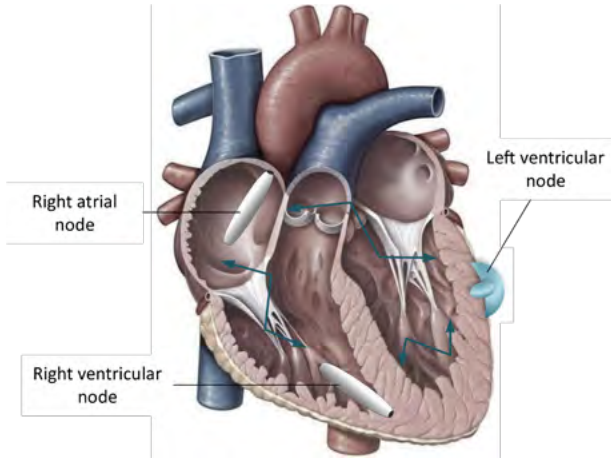
## » 使用仿真分析 IBC 路径损失

MicroPort CRM 的团队与电子设计自动化厂商 Synopsys 公司合作, 使用 Synopsys Simpleware™ 软件开发了一个可导入 COMSOL Multiphysics® 软件的人体躯干模型 (图 3)。该模型是基于苏黎世社会信息技术研究基金会验证的一个人体模型 (“公爵” 模型, 代表一名 34 岁的男性) 建立的。

该团队创建的几何模型包括器官、肌肉、骨骼、软组织和软骨。他们将模型导入 COMSOL Multiphysics® 后, 建立了一个近似胸腔以区分心肌和血液。Maldari 说: “对我的应用来说, 包含这些特征很重要, 因为它们具有不同的材料属性。” 随后, 团队设计了两个相同的无导线心脏起搏器胶囊, 用于评估心内信道的衰减水平。

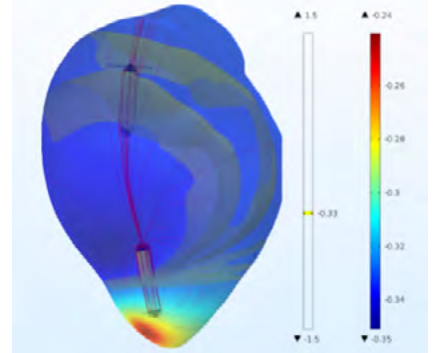
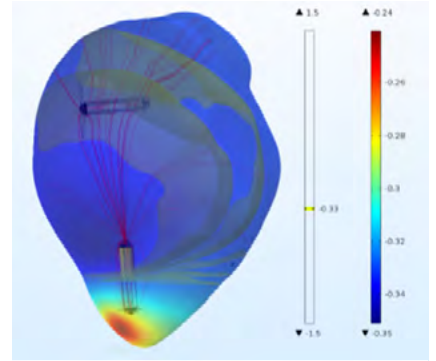
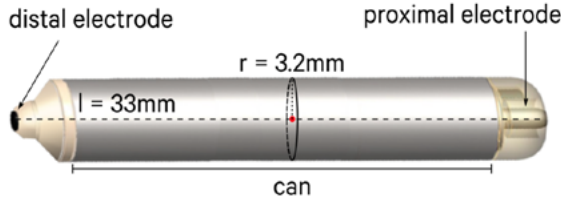
模型中两个胶囊以不同方向放置, 信道距离均为 9 cm。他们通过准静态方法计算了在 40 kHz ~ 20 MHz 频率范围



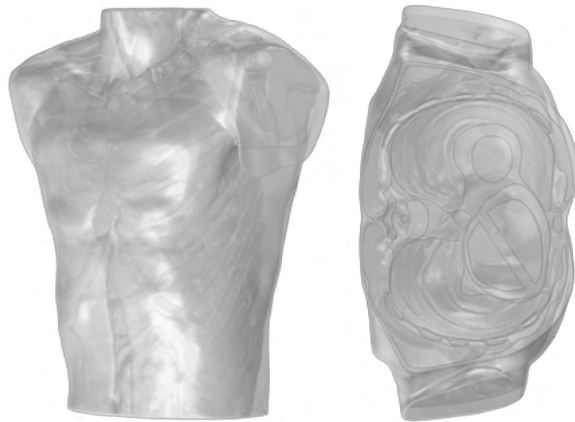


**图 1** 植入两个胶囊的多节点无导线心脏起搏器系统。图片经 Pearson Education, Inc., New York, New York 授权修改后使用。图注: Right atrial node - 右心房节点; Right ventricular node - 右心室节点; Left ventricular node - 左心室节点

**图 2** 用于 IBC 研究的无导线心脏起搏器原型。图注: distal electrode - 远端电极; proximal electrode - 近端电极; can - 金属罐



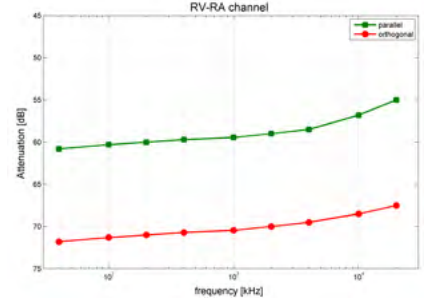
**图 4** 最差(上)和最佳(下)情况下右心房的胶囊位置。



**图 3** 导入 COMSOL Multiphysics® 中的人体躯干 CAD 模型(左)及其横截面视图(右)。

内的信道衰减。图 4 的仿真结果显示了最差(垂直)和最佳(平行)情况下右心房胶囊的位置。最佳情况下,接收偶极上的差分电压更高。两种情况下心脏内信道的衰减水平如图 5 所示,衰减相差约 11 dB。在 40 kHz ~ 20 MHz 频率范围内,两种情况下的衰减均减少了 5 dB。仿真结果显示, Maldari 和他的团队能够验证胶囊的相对位置和方向对信道衰减有显著影响。

对于 MicroPort 而言,在准备原型之前估计衰减水平非常重要。“作为研究人员和科学家,我们试图减少动物试验的次数,仿真帮助我们实现了这个想法。” Maldari 说道,“COMSOL 软件是一个强大的工具,我们可以在试验研究之前,评估生物组织内的信号传输情况。”团队使用仿真能够建立准确的 IBC 模型,用于优化无导线心脏起搏器系统的收发器。



**图 5** 两种情况下心脏内信道的衰减水平。图注: RV-RA channel - RV-RA 信道; Attenuation - 衰减; frequency - 频率

## » IBC 的未来计划

未来, MicroPort 将进一步研究一些参数,如电极尺寸和偶极子长度对整个电场的影响。这将有助于他们找出心脏舒张和收缩时信道的衰减差异。目前,研究人员正在设计一种用于同步无导线心脏起搏器的超低功率接收器,这种新的接收器有可能见证双腔起搏器的突破性创新。©

Physixfactor 公司, 荷兰

# 兼顾鱼类保护的 水力涡轮发电机设计

荷兰采用的沿海防洪结构也可用于潮汐发电。严格的荷兰国家标准和欧洲标准要求新设计的涡轮机应包含鱼类安全通道。为了帮助 Water2Energy 公司开发这种涡轮机转子设计, Physixfactor 公司使用仿真设计了一种在水中使用的 Darrieus 风力涡轮机。实验结果表明, 与传统的水力涡轮机相比, Water2Energy 公司设计的垂直轴涡轮机可将鱼类死亡率从 20% 降至 1% 以下。

作者 ALAN PETRILLO

“在荷兰, 我们跟海洋很亲密。” Helger Van Halewijn 淡然一笑。北海 (the North Sea) 与荷兰人密不可分, 在这种亲密又动荡的关系中, 荷兰人学会了坚韧和灵活应对。从长远来考虑, 相比于和水做斗争, 更明智地做法是“达成一个周密的休战协议”。荷兰著名的堤坝、运河和田地景观并没有阻隔大海, 而是将水流重新引到一些可管理和利用的地方。

这种足智多谋体现在诸多现代荷兰基础设施项目, 以及实现这些项目的人身上。“我们不仅使用堤坝防洪,” 工程设计咨询公司 Physixfactor 的主管 Van Halewijn 说, “还可以利用它们来解决能源需求, 同时保护鱼类和环境。” 为了实现这些目标, 荷兰 Water2Energy 公司向 Van Halewijn 寻求协助, 模拟用于防洪结构的垂直轴水力涡轮机 (vertical-axis water turbine, VAWT)。为了产生更多的电力, 同时最大限度地减少对海洋生物体的潜在危害, Van Halewijn 借助多物理场仿真, 优化了 Water2Energy 公司的垂直轴水力涡轮机。

与重视环境保护的理念一样, 这种潮汐发电项目技术可能是先进的, 但是也会对脆弱的 (但受到严格保护的) 荷兰土地产生深远的影响。

## » 泽兰和三角洲工程: 一个岌岌可危的保护地

如果说荷兰有一个可以被认为最靠近大海 (并且受海洋影

响最大) 的地区, 那么很可能就是名字里有“海”的地区: 泽兰 (Zeeland, 荷兰语意为“海洋之地”)。泽兰是荷兰最西部、人口最少的一个省, 同时也是一个河流三角洲, 斯海尔德河 (Scheldt)、默兹河 (Meuse) 和莱茵河 (Rhine) 都经这里流入北海。泽兰省总面积的三分之一以上都是水, 其盾徽上画着一只狮子浮在海浪中, 描绘的就是该地区的拉丁语格言“我挣扎着浮出水面 (*luctor et emergo*)”。

即使按照荷兰的标准, 泽兰也特别容易受到北海风暴的影响。如今被称为“Water-snoedramp”的风暴在 1953 年永久地改变了这个地区的风貌。在风、潮汐和风暴潮的共

同作用下, 泽兰海平面超出平均海平面 4 米。这次风暴不仅冲毁了堤坝, 淹没了 16.5 万公顷 (1650 平方千米) 的土地, 还导致 1800 多人死亡, 成千上万的人被迫逃离该地区。为了抵御风暴的威胁, 荷兰在整个三角洲地区建立了一个复杂的水坝和屏障系统。

按照荷兰的传统, 这些三角洲工程并没有将海洋和陆地完全隔开。它必须平衡抵御周期性风暴的需求与该地区的日常需求, 包括渔业和通往鹿特丹和比利时安特卫普主要港口的航运。因此, 三角洲工程采用了固定屏障与半开放结构相结合的系统, 并且仅在出现威胁性风暴潮时才关闭。



图 1 荷兰地图，放大显示了泽兰省及其主要防洪设施。原始图片由 TUBS 提供，通过 Wikimedia Commons 获得许可 (CC BY-SA 3.0)。图片经过修改。

## » 反馈循环：三角洲工程不断演变的优先事项

正如人们对这个庞大且复杂的项目所预期的那样，三角洲工程的建设已经持续了数十年（图 1）。自该项目启动以来 70 多年间，其优先事项不断在演变。除了提供免受海洋风暴侵扰的保护外，三角洲工程还改变了区域生态系统，但这些改变有利有弊。“20 世纪中期，当这个项目被设计出来时，它还是一个全新的理念。以前世界上没有人做过类似的水利工程，人们也不像今天这样重视环境。” Van Halewijn 解释道。

除上述的半开放屏障外，最初设计的三角洲工程还包含一些封锁河口的大坝，这些大坝在海洋咸水和河流淡水之间形成了新的分界。在大坝后面，过去受潮汐影响的地区变成了淡水湖。“现在我们认为之前的设计是错误的。” Van Halewijn 说道。自 20 世纪 70 年代以来，许多水坝都安装了水闸。这些可控的通道在正常情况下保持开放，仅在暴风雨期间才关闭。水闸为大坝后面的盆地重新带来了潮汐周期，使其恢复为适合牡蛎、贻贝和其他沿海海洋生物生存的咸水环境。

## » ENCORE 和 Water2Energy：脆弱地区的可再生能源潜力

虽然泽兰的情况不同寻常，但气候变化导致的海平面上升正在威胁着全球沿海地区。荷兰从数百年与海洋的“谈判”中获得的基础设施专业知识，比以往任何时候都更具有全球意义。在这种背景下，看到荷兰率先采取的跨境举措，如利用海洋可再生能源振兴沿海地区项目（ENCORE），就不足为奇了。

ENCORE 是一个由 Interreg 2 Seas 项目资助并由海洋

可再生能源专业机构 MET/SUPPORT 领导的联合项目，它提出了北海地区在气候变化下的脆弱性及其作为能源生产来源的潜力。该项目中来自英国、法国、比利时和荷兰的合作伙伴一致认为，到 2050 年海洋可再生能源可以满足 25% 的欧洲能源需求。目前，三家参与该公司的公司正在开发海上太阳能、波浪能技术和河流涡轮机，Water2Energy 公司正尝试利用流经三角洲工程水闸的潮汐流发电。

## » Darrieus 转子：将风力涡轮机用于水力设计

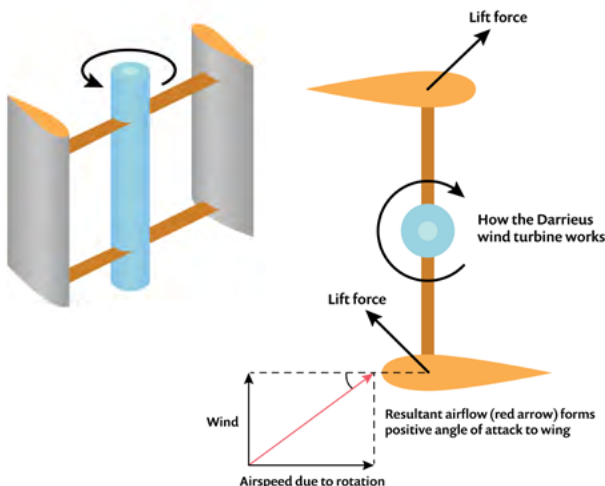
具有源源不断的流水的地方似乎是水力发电的理想场地。然而，尽管开发潮汐发电的潜力看似简单，实际上却面临着许多挑战。传统的水力发电技术（图 2）并不适合三角洲工程。“Kaplan



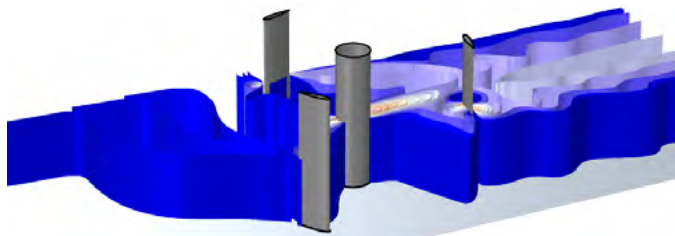
图 2 Kaplan 涡轮转子示例。图片由 Reinraum, CC0 提供，通过 Wikimedia Commons 获得许可。

转子是涡轮机最常见的设计，” Van Halewijn 解释说，“它的转速非常快，看上去像是为船舶提供动力的螺旋桨。如果将其置于一个狭窄的空间，比如大坝的水闸，就会对鱼类和其他海洋生物造成危害”。为了解决这些问题，Water2Energy 公司开发了一种采用 Darrieus 转子的垂直轴水力涡轮机（图 3）。

1926 年，Georges Jean Marie Darrieus 为用于风力涡轮机的 Darrieus 转子申请了专利，这项以他的名字命名的设计潜在地惠及了各类水利应用。Water2Energy 公司认为，Darrieus 转子的开放式结构和运动模式对鱼类的危害远小于 Kaplan 转子，这是它最显著的优势。那么，它是否能够满足 ENCORE 项目宏大的发电目标呢？为了平衡最大化电力输出和最小化生态危害的需求，Water2Energy 必须解决 Darrieus 设计中的一些固有难题。



**图 3** Darrieus 转子示意图。图片由 Saperaud-commonswiki 提供，通过 Wikimedia Commons 获得许可 (CC BY-SA 3.0)。图片经过修改。  
图注: Lift force - 升力; Wind - 风力; Airspeed due to rotation - 旋转产生的气流速度; How the Darrieus wind turbine works - Darrieus 风力涡轮机转动方式; Resultant airflow (red arrow) forms positive angle of attack to wing - 红色箭头表示的是由风和旋转气流组成的气流形成正向的叶片攻角



**图 5** 通过 Water2Energy 水力涡轮机的流体流动。

## » 随波逐流：涡轮叶片攻角的不断优化

对于 Water2Energy 公司的潮汐发电涡轮机而言，最重要的设计之一包括转子垂直叶片的优化 (图 4)。通过对叶片的设计以及调整叶片角度的机制进行测试和完善，Van Halewijn 解决了两个技术难题：一是即使处在连续流动的水流环境中，Darrieus 转子也并不总是能自动启动；二是安装在封闭通道 (如通过水坝的水闸) 中的旋转涡轮，比在露天或水中自由旋转的涡轮更容易受到湍流的影响。

上述两个难题都可以通过不断调整涡轮叶片的攻角来解决。当 Darrieus 转子叶片与水流方向呈合适的夹角时，即使在极低的水流速度下，也能开启运动。存在的问题是，用于启动叶片的最佳攻角，在涡轮机开始转动后并不能使其高效运转。类似地，使叶片顺利通过外壁的最佳角度，在叶片旋转至其他位置时的效率又会很低。为了解决这个问题，Van Halewijn



**图 4** Water2Energy 水力涡轮机设计示意图。包括垂直叶片 (以白色显示) 的转子机构。

使用 COMSOL Multiphysics® 软件模拟了不同的叶片位置对涡轮机性能的影响。

“迄今为止，这类应用仍没有最佳的设计方案。我们将 Water2Energy 公司的设计方案与仿真相结合，得出了一个更好的解决方案。借助 COMSOL® 软件，我们能够测试不同的方案并得到一个最佳方案。” Van Halewijn 说道。

为了找到最佳攻角，Van Halewijn 仅对涡轮的单个叶片进行了仿真。为了模拟涡轮叶片周围的湍流，他在 COMSOL 软件中尝试了不同的流体流动计算方法。标准的  $k-\epsilon$  模型不太适合这个问题，也没有得到最佳的功率输出；而所谓的 SST 模型结合了自由流中的  $k-\epsilon$  模型和近壁面中的  $k-\omega$  模型，计算结果很好但模型收敛时间过长。因此， $k-\omega$  模型既满足项目需求，又兼顾了计算资源。

在对涡轮叶片周围的湍流进行多物理场建模后，Van Halewijn 找到了最佳的叶片轮廓设计。“我总是向客户解释，仿真软件是研发的决策工具，而不是单纯的数学计算工具。通过仿真，我能将项目推向正确的方向，并且不需要太多的试错。事实上，仿真可以帮助我基于稳健的物理学原理做出更好的决策。” Van Halewijn 说道。

“建立叶片的轮廓模型之后，我们就可以模拟它经过通道壁的运动了 (图 5 ~ 图 6)。这意味着我们必须调整叶片表面的网格，以使其适应叶片  $360^\circ$  旋转过程的每一步。” Van Halewijn 解释道，“在设计过程中，我能够在软件中添加一个特殊节点来达到最大产能设计。当然，我们必须模拟鱼类通过涡轮机的过程，让人们相信海洋生物不会受到伤害，甚至不会受到原型测试的影响。”

## » 高效且对鱼类友好：现场测试验证了新设计的潜能

Water2Energy 公司在三角洲工程水闸通道内对其可调节叶片的 VAWT 机制进行了现场测试 (图 7)。测试结果表明，重新设计的涡轮机比现有的固定叶片设计在功率输出性能上提升了 40% 以上。

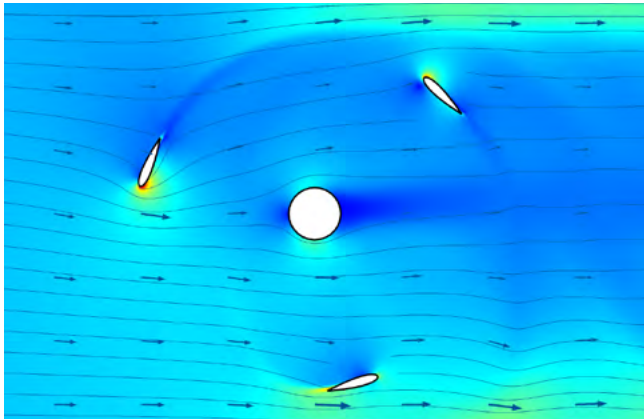


图 6 在 COMSOL Multiphysics 中模拟的涡轮叶片周围的流场图(上)和扭矩图(下)。图注: Torque Blade – 叶片扭矩

Darrieus 转子涡轮机证明了它可以潮汐能转化为电能,同时可以保护海洋生物。在使用 Kaplan 转子涡轮机时,高达 20% 的鱼类会在经过快速旋转的叶片时丧生。通过 Van Halewijn 仿真优化后, Water2Energy 的涡轮机将鱼类死亡率降低到 1% 以下。安装在水闸通道上的摄像机生动地演示了当垂直调节叶片按照预期工作时, 鳟鱼能够安全地游过。

在证实新设计有效后, Water2Energy 公司现在正致力于开发其商业潜力。一个名为泽兰风力发电厂 (Climate Power Plant Zeeland) 的集团提议在泽兰地区的 Grevelingendam 建造一座潮汐发电厂, 其中一个方案建议使用 6 个 Water2Energy 公司的水力涡轮机(总输出功率为 1.6 兆瓦), 为大约 1000 个家庭供电。

## » 浪漫又务实: 与上升海平面的契约

虽然 Van Halewijn 非常乐意分享有关潮汐发电涡轮机项目的细节,但他也提醒我们要拓宽视野:“这个故事不仅仅是在讨论仿真,我们还必须关注其所处的背景。”



图 7 Water2Energy 水力涡轮机原型,即将进行现场测试。

从这个角度来看,我们可以看到由一个小国家的一些小公司完成的工作所具有的深远意义。现在,世界的福祉可能取决于我们与自然力量谈判的能力,这些力量可能像北海风暴一样巨大,也可能像使鳟鱼能够安全地随波逐流一样小。Van Halewijn 说:“我们正在寻求一个双赢的局面。”

## 关于 ENCORE 项目

ENCORE 项目旨在以结构化和协作的方式推进 4 种海上可再生能源技术——波浪能转换器、潮汐和河流涡轮机以及海上浮动太阳能,并开发开源工具和服务,以促进岛屿、港口、河口加速采用近海能源解决方案,并重点关注 Interreg 2 Seas 海域的离岸结构和出口机会。

ENCORE 项目由 2014—2020 Interreg 2 Seas 项目资助,该项目由欧洲区域发展基金 (European Regional Development Fund) 根据第 2S08-004 号补偿合同共同资助。此外,南荷兰省、北荷兰省和泽兰省也提供了财政支持。

主要合作伙伴兼协调方 MET/SUPPORT 汇集了来自 4 个欧洲国家的项目合作伙伴: Water2Energy (荷兰)、EEL Energy (法国)、Ocean of Energy (荷兰)、Teamwork Technology (荷兰)、Dutch Marine Energy Centre (荷兰)、the European Marine Energy Centre (英国)、Artelia (法国)、Bureau Veritas (法国)、Ghent University (比利时)、Inyanga (英国) 和 Deftiq (荷兰)。



L-Acoustics 公司, 法国

# 看见声音: 仿真揭示音箱设计对扬声器性能的影响

L-Acoustics 为竞技场和音乐厅定制音响系统。为了提高低音反射式扬声器的设计进程,他们使用仿真技术模拟了音箱的箱体和通风口的设计对扬声器的声音输出和品质的影响。

作者 ALAN PETRILLO

当观众融入到现场演出中,成为节目的一部分时,这样的现场活动是最令人难忘的。无论是交响乐、歌剧、足球比赛还是音乐节,当观众的情绪与演出融为一体时,他们将会拥有更强烈的体验。与观众建立联系是每位表演者的愿望,然而,仅凭一己之力,他们难以实现这一

目标。

现场演出为我们带来精彩的视听体验,离不开幕后工作人员的努力付出,包括舞台工作和布景设计。我们的目光专注于舞台和布景,虽然有许多重要的设备我们未必能看得见,但我们确实可以听到它们的声音。

L-Acoustics 是一家致力于为现场演出提供震撼视听效果的全球性公司。对于典型的音乐会常客或体育迷来说,尽管他们可能没有听说过 L-Acoustics,但在某些现场,他们或许已经听过 L-Acoustics 的声音。L-Acoustics 总部位于法国,已经为超过 80 个国家和地区的 10000 多个场所提供过音响系统,在全球排名前 20 位的音乐节中,半数以上都采用了他们的设备。

出色的性能源自对工艺的不懈追求。L-Acoustics 一直坚持产品的持续改进和优化,才能满足不同的演出需求。扬声器音箱的尺寸和形状会对音质产生很大的影响。为了确保观众能够完全沉浸在演出的氛围中, L-Acoustics 的工程师们通过仿真技术以说明箱体和通风口设计对声学输出和线性的影响。

正如现场表演者通过娴熟的演奏带给我们美妙的音乐,多物理场仿真让 L-Acoustics “看到”了低音反射式扬声器单元中塑造声音的力量。

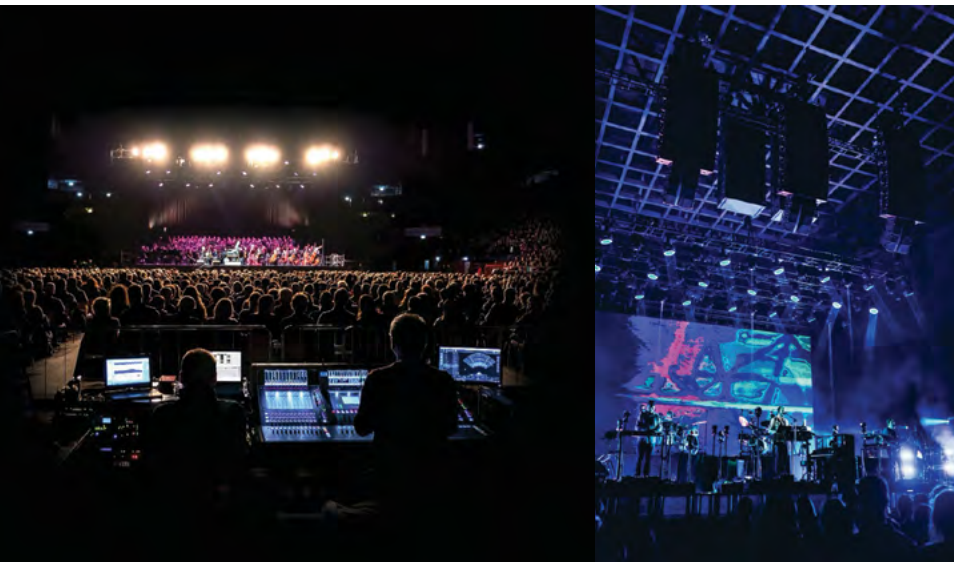
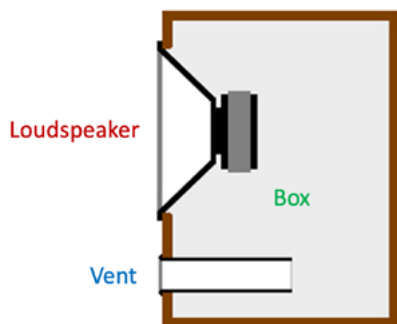


图 1 许多活动场所都会使用 L-Acoustics 设备来提供优质的音响效果。



**图 2** 低音反射式扬声器的示意图。  
图注: Loudspeaker- 扬声器; Box- 箱体;  
Vent- 通风口

### » L-ACOUSTICS 的愿景: 像激光一样的声音

您可能发现, 从加利福尼亚的好莱坞露天剧场到日本的樱花园, 许多历史悠久且知名度高的场所均应用了 L-Acoustics 的音响系统, 而 L-Acoustics 至今成立还不到 40 年。1984 年, 物理学家 Christian Heil 创立了 L-Acoustics 公司, 并于 1992 年推出了 V-DOSC 线源阵列技术, 迅速成为专业扬声器系统的全球标准。线源阵列以一种极度聚焦和可控的方式 (类似于用激光引导光的



**图 3** 典型的用于测量声损耗的室外装置。箭头所指的是麦克风的位置。

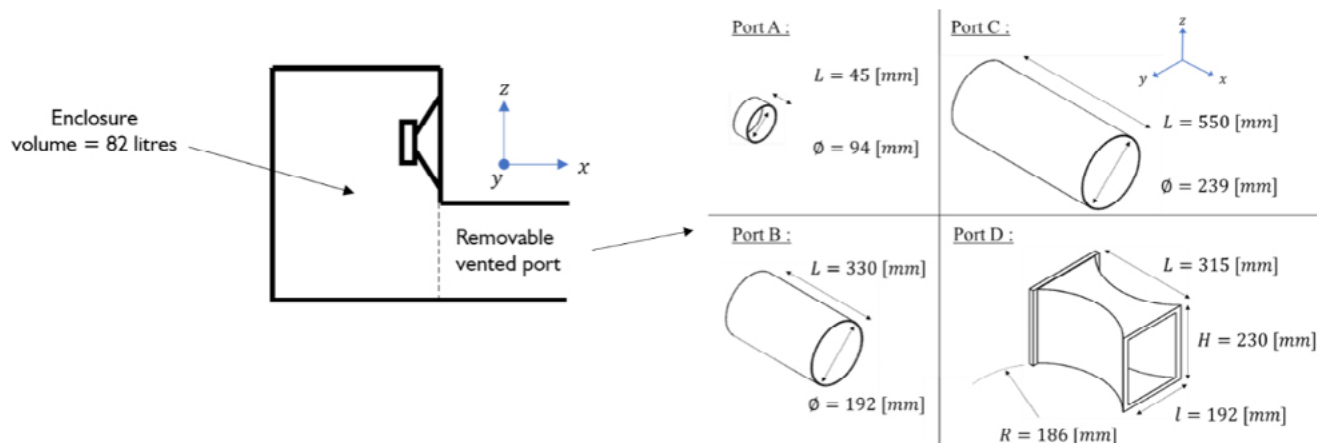
方式) 投射声音。激光的能量与其精确性密不可分, 扬声器也是如此。

“我们希望尽可能地开发一款线源扬声器,” L-Acoustics 公司声学研究主管 Yoachim Horyn 介绍, “我们尝试消除任何比预期更高的频率或谐波发出的能量。无论增加多少输入功率, 我们都希望只是提高音量而保持音质不变。”然而, 失真只是其中一个问题, 在频率发射时, 还可能会出现非线性的全局输出损耗。

除了扬声器驱动器自身的设计, 箱体设计也对其性能起着重要的作用。例如, 低音反射式箱体设计了一个亥姆霍

兹谐振器的通风口。通过将扬声器箱体的内部空间与外部空气相连通, 谐振器可以帮助回收向音箱内部发射的部分能量, 防止其流失。此设计虽然可以提高功率, 但也可能会引入湍流, 使扬声器的输出失真, 并有可能导致高达数分贝的声损耗。尽管存在这种风险, 但谐振器所具有的潜在优势仍使其成为 L-Acoustics 用于扩声的一个重要工具。

“我们的扬声器必须具有非常高的输出声能, 谐振器设计不当可能会因为湍流而损失超过一半的输出, 因此设计有效的通风口非常重要。” Horyn 团队的声学工程师 Yves Pene 解释说。



**图 4** 带有端口的实验性通风箱体示意图 (左) 和用于测试的四种模拟通风设计 (右)。图注: Enclosure volume – 音箱容积; Removable vented port – 可移动的通风口; port – 端口

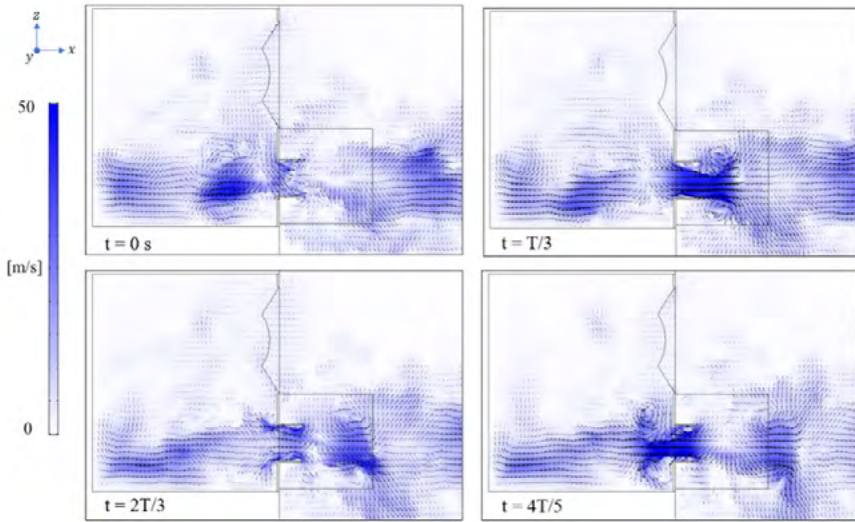


图 5 在某段时间内，带通风口设计的箱体在共振频率下的速度值。

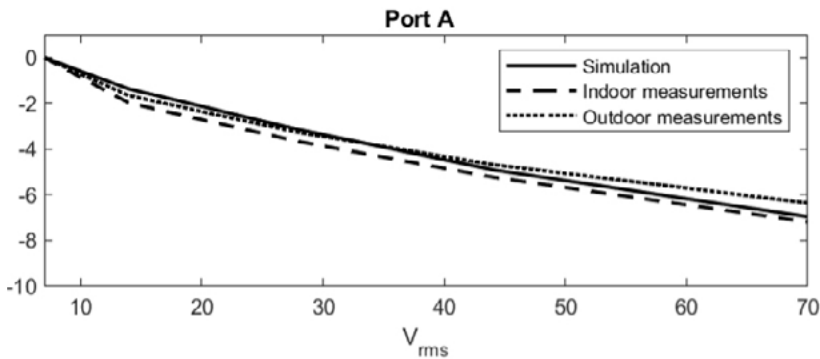


图 6 带端口设计的箱体的声损耗模拟测试，与物理实测结果进行比较。图注：Simulation- 模拟值；Indoor measurements- 室内测试值；Outdoor measurements- 室外测试值；Port- 端口；Acoustic Loss- 声损耗

### » 通过木制箱体模型、黏土及注入烟雾模拟测试音箱通风口的声损耗

“多年来，研发团队一直面临着通风口设计与试验的挑战。” Horyn 解释，“我们无法准确预测高排气量对音箱所造成的损失。”这意味着每一次对音箱或谐振器通风口的设计进行调整后，团队必须重新建立和测试木制音箱模型。有时，他们也会使用黏土快速改变通风口或内部通道的形状。这个过程非常耗时，并且即使是一个完整的物理原型也无法提供他们需要的所有数据。

“测量声损耗和失真的过程很有趣，但你不一定能发现问题所在。” Horyn 说，“有时候，问题可能来自音箱或通风口中某个你没考虑到的位置。难以通过木制模型准确地找出问题所在。” L-Acoustics 团队想出了一个有趣的方法来解决这个问题。“我们过去的做法是将音箱的一些面板做成透明的，通过向扬声器内注入烟雾来观察湍流。” Horyn 说道。

虽然透明面板对模型测试很有帮助，但其制作过程仍然十分耗时。“在设计 and 构建模型时，从设计图纸到实际测

试需要花费数周的时间，” Horyn 解释，“而且通常需要多次调整才能得到我们想要的设计。”

### » 现在和未来项目的仿真

为了帮助 L-Acoustics 团队避免在木工制作上耗时过多，将精力主要放回在声学工程的研究上，Yves Pene 将目光投向了多物理场仿真。他在 2020 年向国际音频工程协会发表的研究论文（参考文献 1）中提到，他的目标是对给定扬声器、音箱体积和端口设计的通风口系统中的非线性声损耗进行建模和预测。仿真结合了扬声器驱动器运动和由此产生的流体运动的耦合效应，包括湍流和相关现象。Pene 开发了 this 模型以测试四种不同的扬声器通风口设计（图 4）对给定扬声器和音箱的影响。

为了验证仿真结果，他们对于一个带有可拆卸通风口的扬声器音箱进行了后续试验测试。测试结果与仿真的预测结果非常吻合：预测的声损耗与现场实际测量值的偏差不到 1 dB。“我们对结果非常满意。” Pene 说道。

Pene 的仿真项目成功地揭示了仅依靠原型设计无法洞察的一些细节。在 L-Acoustics 的研发工作流程中引入仿真，有望在未来获得更多的益处。正如该团队在研究报告中所提及的，通过仿真，可以获得音箱模型和通风口设计在测试中更详细的速度值和涡量分布。由此可以了解模型的每个表面是如何产生湍流并影响整体音质的。这种深入细节的方法向团队展示了过去从没考虑过的失真来源。

例如，流体运动图显示，通风口在音箱中的位置对整体气流流动产生了意想不到的重要影响。这一发现表明研究团



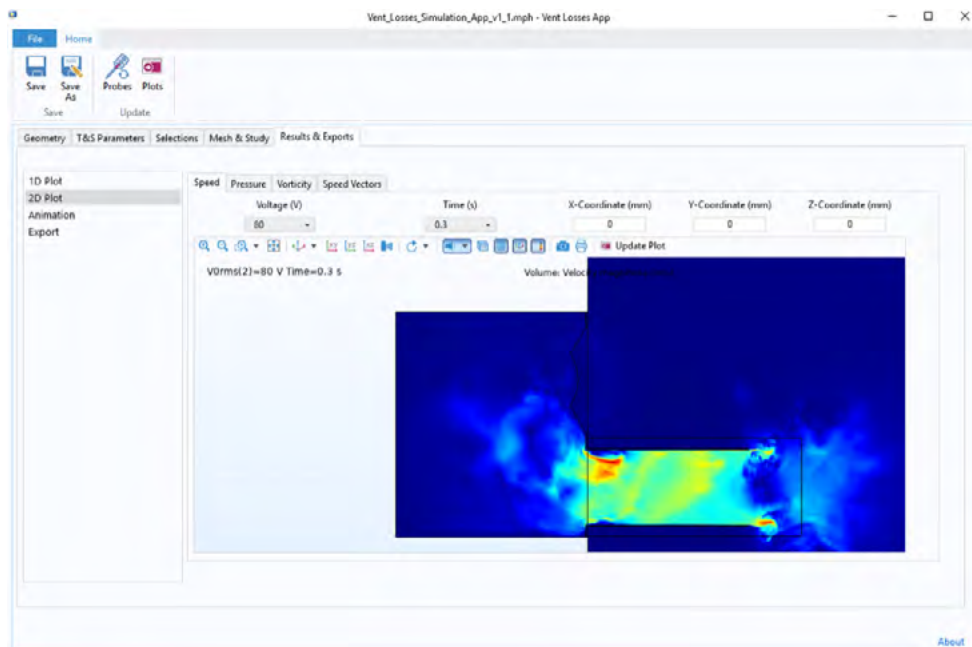


图 7 L-Acoustics 研发团队创建的仿真应用程序。

队应该更加关注通风口的位置和形状。团队借助仿真,明确了进一步研究和改进的新方向。

在使用仿真之前, L-Acoustics 工程师通常需要等待数周才能看到每个物理模型的测试结果,这说明他们需要耗费大量的时间在模型设计上,但最终不一定都能用得上。现在,正如 Horyn 所解释的,“我们的研发团队每天都会通过仿真对他们的构想进行验证测试,因此在构建任何模型之前,我们可以高效地对新的设计方案进行预测。然后建模,

**“App 开发功能非常方便,它使我们能够以合理的价格让更多的人使用仿真。”**

—— YOACHIM HORYN,  
L-ACOUSTICS 公司声学研究主管

以保证在首次测试时能够符合我们的构想。” Pene 补充道。

### » L-ACOUSTICS 利用仿真为更多的工程师赋能

仿真技术除了应用于该项目, Yves Pene 还将这项技术引入到低音反射式音箱的设计中,为团队带来了更广泛的益处。声学研发团队的其中一项工作是确保他们开发的工具能够被有效地使用,他们通过 COMSOL Multiphysics® 中的 App 开发器,从模型中建立专门的用户界面,这可以在整个公司内广泛地推广使用。“我们越来越多地使用 App 开发器,” Horyn 说,“在这个项目结束时,声学工程团队基于 Yves 的多物理场模型建立了一个使用方便的仿真应用程序。用户只需定义他们项目所需的特定参数即可,因为其他的数值已经在仿真应用程序中设置好了”。

通过部署产品 COMSOL Server™ 可以将该仿真应用程序发送到其他团队

成员,用户可以自行访问和进行仿真。Horyn 表示,“应用程序开发功能非常方便,它以合理的价格让更多人享受到仿真技术的好处。”

### » 练习,练习,再练习: 对性能的追求永无止境

最出色的专业音响系统是被听见,而不是被看见。然而,被现场音乐包围,听众仿佛和表演者融为一体的感觉,可以通过许多幕后人员的努力和专业设备来实现。无论是麦克风、功放,还是信号处理器和扬声器,都能使观众沉浸在现场声音的氛围里。和音乐家们一样, L-Acoustics 的声学工程师们明白,台上一分钟,台下十年功,这是永无止境的不懈追求。Yoachim Horyn 和 Yves Pene 已经通过仿真完成了他们的设计和研究工作,现在,他们正利用它进行更深入的探索改进:“时刻准备着,突破将在不远处”。☺



L-Acoustics 公司的 Yoachim Horyn (左) 和 Yves Pene (右)。

### 参考文献

1. Pene, Y. Horyn, and C. Combet, “Non-linear acoustic losses prediction in vented loudspeaker using computational fluid dynamic simulation”, Audio Engineering Society, Paper 10359, 2020.

布里斯托大学, 英国

# 仿真探究飞蛾翅膀的声学伪装特性

一些飞蛾因其特殊的鳞片状翅膀所具有的声学伪装特性, 可以避免蝙蝠的回声定位。为了更好地理解其中的声振现象, 英国布里斯托大学的研究人员尝试对这种效应进行模拟, 探索宽频声学伪装在其他领域的潜在应用。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

你是否曾经看到过地面、树枝或灌木丛上的叶子突然动了一下? 许多昆虫和蛛形纲动物通过与周围环境融为一体来伪装自己, 以避免掠食者的捕食。例如, 兰花螳螂的翅膀看上去就像一朵兰花的嫩芽, 竹节虫的胳膊和腿长得像棕色的小树枝, 月形天蚕蛾的一对荧光绿色的翅膀与明亮的树叶非常相似。

然而, 在试图避开昆虫的主要捕食者之一——蝙蝠时, 这种视觉伪装功能不一定有效, 因为蝙蝠不是用眼睛看, 而是通

过回声定位来导航寻找食物。那么, 在这种情况下昆虫该如何保护自己呢? 事实证明, 某类飞蛾, 如卷心菜树皇蛾 (*Bunaea alcinoe*) 具有的鳞片状翅膀表现出的声学伪装特性, 能够保护它们免受蝙蝠的声呐探测。

英国布里斯托大学 (University of Bristol) 的研究人员通过数值仿真技术研究了这种鳞状翅现象, 并探索了这类声学伪装功能在其他领域应用的潜在可能性。

## » 回声定位遇见声学伪装

6500 万年以来, 蝙蝠一直在寻找飞蛾作为其食物来源。有些飞蛾可以探测到蝙蝠靠近的信号, 有些飞蛾则使用毒液防御或发出“咔嚓”声使蝙蝠受到惊吓而飞走。卷心菜树皇蛾既无听觉又无毒性, 但它也并非毫无办法。它依靠的是一种更加被动的防御策略: 声学伪装 (也称为“声隐身”)。

飞蛾如何利用声学伪装来抵御蝙蝠的袭击呢? 近距离观察飞蛾的翅膀, 我们就能找到答案。飞蛾的翅膀是由几丁质 (一种由葡萄糖衍生的长链聚合物) 构成的固态薄膜, 坚硬的翼脉将它们固定在适当的位置。通过更加仔细地观察, 我们会发现飞蛾翅膀的上下表面覆盖着一排排重叠的鳞片, 类似于屋顶上的瓦片, 每一片鳞片都是多孔的复杂结构。布里斯托大学的研究人员 Zhiyuan Shen 说: “精细的鳞片结构意味着其经历过



图 1 卷心菜树皇蛾 (*Bunaea alcinoe*)。图片由 Lsardonkey 拍摄, 通过 Wikimedia Commons 获得许可 (CC BY-SA 4.0)。

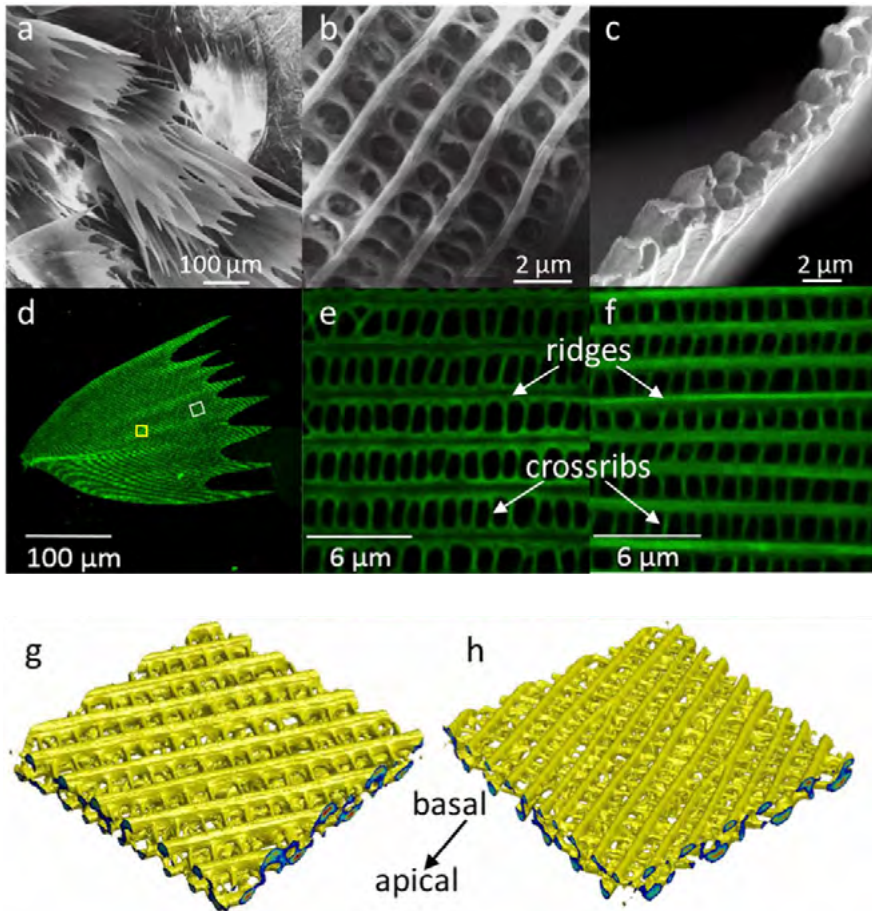


图2 飞蛾翅鳞结构的各种显微视图。图注：ridges – 脊线；crossribs – 横肋；basal – 基底的；apical – 顶端的

复杂的进化适应, 类似于用于视觉信号的高度组织化纳米级光子结构。”

这些翅鳞的长度小于 0.25 mm, 不及蝙蝠用于回声定位的波长的 1/10, 蝙蝠使用的信号频率为 11 kHz ~ 212 kHz (参考文献 1)。布里斯托大学的研究人员在其论文 *Biomechanics of a Moth Scale at Ultrasonic Frequencies* 中假设, 飞蛾翅膀可以被归类为具有亚波长尺寸厚度的超薄吸声体, 起到共振吸声的作用。为了验证这一假设, 该小组期望能够捕获翅鳞中的主要物理现象, 并证明飞蛾翅鳞可以在共振时获得高吸声系数。为此, 他们选择了数值仿真。

### » 先进成像技术遇到数值仿真

首先, 研究人员在实验室中培养了几个蛾蛹直到其成熟。然后, 他们收集了飞蛾翅膀的样本, 使用了两种先进的成像技术——扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 和共聚焦显微镜 (confocal microscopy)。SEM 技术是将飞蛾翅膀的各个部分固定在黏性碳片上, 然后涂上一层 5 nm 的薄金层。接着, 在高真空和变压模式下对飞蛾翅鳞进行成像, 并放大以获得高清图像。在共聚焦显微镜检测过程中, 研究团队将单片翅鳞浸入甘油中, 并将其密封在两个显微镜载玻片之间, 然后通过自体

荧光技术获取超清图像。

获得飞蛾翅鳞的高清图像后, 团队就能够从图像中提取三维数据并将其转换成三维等值面模型, 在 MATLAB® 软件中将三维模型保存为 STL 格式, 并使用 LiveLink® for MATLAB® 将其导入 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件中。通过使用 COMSOL® 多物理场仿真软件, 研究团队确定了理想的飞蛾翅鳞晶胞单元, 并将其参数化以研究等效的材料属性。

接着, 团队对飞蛾翅鳞进行了声振分析。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件中的周期性边界条件对单个晶胞单元而非整个翅鳞阵列进行建模, 这样可以节省计算工作量和内存。“我们可以将模型简化为几个翅鳞, 并使用周期性边界条件将结构扩展为一个阵列。如果我们创建一个实际的阵列化的模型, 计算量将大大增加。” Shen 说道。该团队在 COMSOL Multiphysics® 中建立了一个宏观有限元模型来模拟以超声波频率振动的翅鳞, 该模型使飞蛾翅鳞的振动计算成为可能。“COMSOL® 软件对解决多物理场耦合问题非常有效。我们需要结合声学 and 固体力学来理解超声波与翅鳞结构是如何耦合的。” Shen 补充道。

**“COMSOL® 软件对解决多物理场耦合问题非常有效。我们需要结合声学 and 固体力学来理解超声波与翅鳞结构是如何耦合的。”**

—— ZHIYUAN SHEN, 布里斯托大学

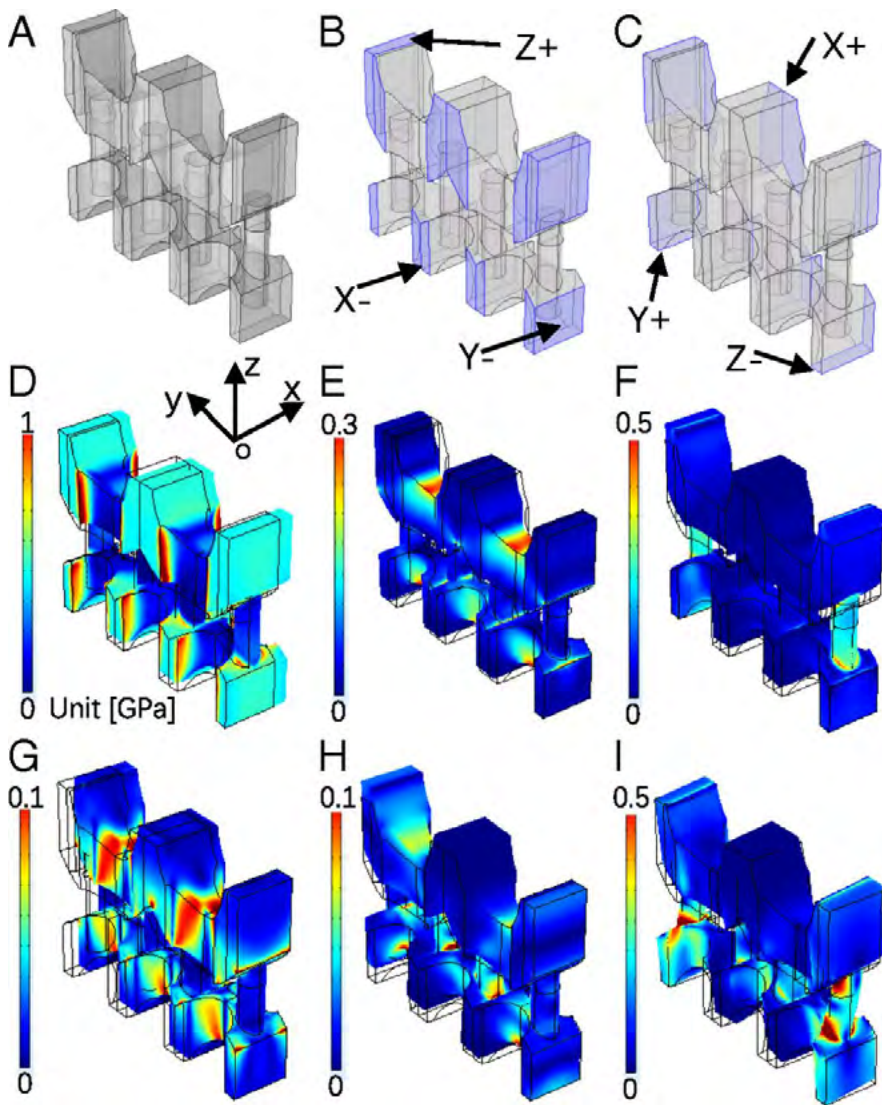


图3 飞蛾翅鳞单个晶胞单元的参数化模型。图注：Unit – 单元

该团队还建立了两个模型来分析飞蛾翅鳞的阻尼效应，以及由这种翅鳞组成的整个蛾翼的超声特性。前者由一端完全固定的单个翅鳞组成；后者则在翅鳞材料中增加了瑞利阻尼，用于计算翅鳞阵列的吸声系数。

### 仿真计算结果与测量值的对比

为了观察模型计算出的飞蛾翅鳞振动与真实振动之间的关系，该团队利用激光多普勒测振仪 (laser Doppler

vibrometer, LDV) 记录了单个翅鳞的振动行为。在一阶和三阶模态中，LDV 的测量结果与计算所得的共振频率非常吻合，分别仅相差了 2.9% 和 1.0%。COMSOL 模型计算得出的共振频率分别为 28.4 kHz、65.2 kHz 和 153.1 kHz，而 LDV 测量结果分别为 27.6 kHz、90.8 kHz 和 152.3 kHz。二阶模态出现了 28% 的偏差，这是因为建模时简化了飞蛾翅鳞的曲率，将实际上变化的鳞片穿孔率设置为了常数，以及在 LDV 测量

期间入射声波不一致等。

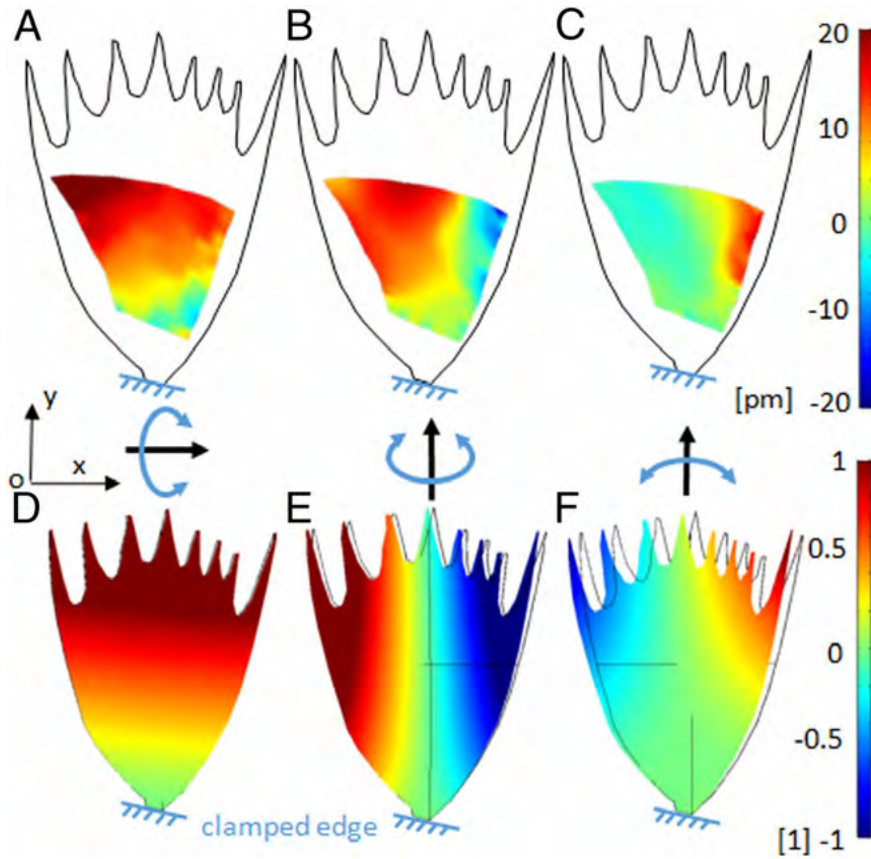
值得注意的是，使用该模型计算得到的飞蛾翅鳞模态与蝙蝠用于回声定位的生物声呐区间 (20 kHz ~ 180 kHz) 相重叠，并且范围很广。为了解这是否只是一个巧合，研究人员再次对一个模拟蝴蝶翅鳞结构的晶胞单元进行了仿真分析。这次的分析结果显示，计算得到的蝴蝶翅鳞的模态 (88.4 kHz、150.9 kHz 和 406.0 kHz) 超出了蝙蝠的生物声呐范围。从进化的角度看，这是合理的：飞蛾是在夜间活动的，通常在蝙蝠的捕食范围内；而蝴蝶则在白天活动，不需要保护自己免受蝙蝠的攻击。这种比较为飞蛾可能已经进化到通过声学伪装来躲避蝙蝠捕食这一理论提供了支持。

### 声学伪装的潜在应用

这项研究是通过数值仿真和实验测量来表征飞蛾翅鳞的生物力学和振动行为的首次尝试。研究表明，多物理场仿真软件可准确捕获飞蛾翅鳞振动行为，为仿真在该领域的应用奠定了基础。未来，布里斯托大学团队计划将现有的周期性模型扩展为一个完整的飞蛾翅鳞阵列三维模型。

这项研究本身对于其他领域也产生了深远的影响。通过理解飞蛾翅鳞的声振行为，研究人员可以着手开发具有相同声学伪装功能的宏观结构。“如果我们可以制造飞蛾翅鳞仿生材料，就可以将其应用于高效超声吸声体。如果我们能找到一种厚度仅为其工作波长的 1/100 的材料，将大幅改进现有的声学设计。” Shen 表示。

未来，我们期望能够看到具有声学伪装特性的增强型降噪材料被用在建筑物设计和国防技术应用中。当从自然界



“如果我们能制造飞蛾翅鳞仿生材料，就可以将其应用于高效超声吸声体。如果我们能找到一种厚度仅为其工作波长的1/100的材料，将大幅改进现有的声学设计。”

—— ZHIYUAN SHEN, 布里斯托大学

中汲取灵感时，你会为自己从中得到的收获感到惊喜。☺

参考文献

1.G. Jones and M. Holderied, “Bat echolocation calls: adaptation and convergent evolution”, Proc Biol Sci., vol. 274(1612), pp.905-912, 2007.

图4 飞蛾翅鳞的共振。图注：clamped edge - 固定端

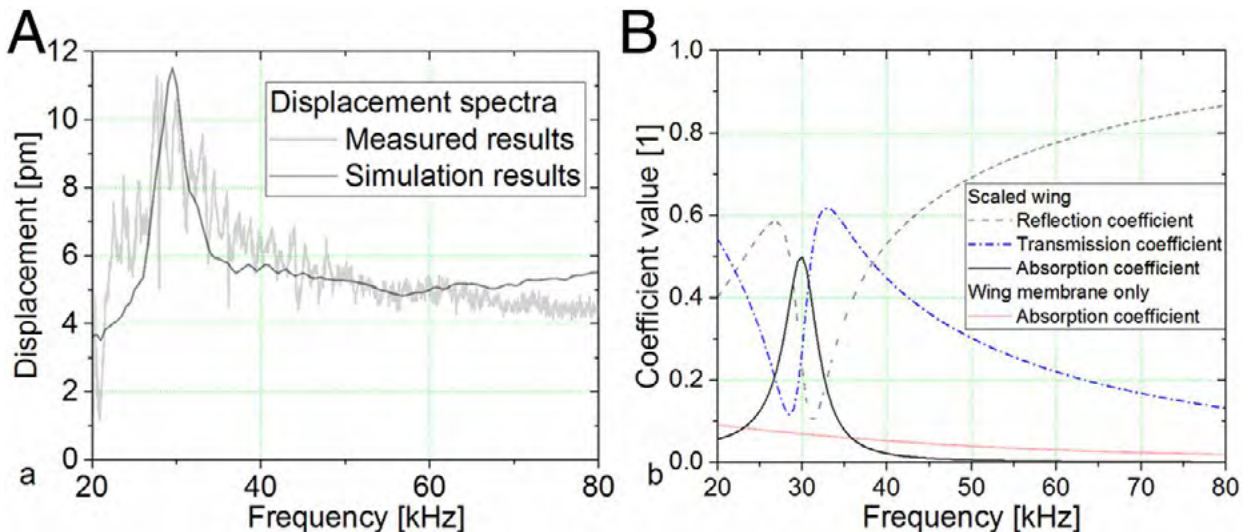


图5 飞蛾翅鳞的模拟结果与 LDV 测量值的比较。图注：Displacement spectra - 位移谱；Measured results - 测量值；Simulation results - 模拟值；Scaled wing - 翅鳞；Reflection coefficient - 反射系数；Transmission coefficient - 传递系数；Absorption coefficient - 吸声系数；Wing membrane - 翅膜；Frequency - 频率；Displacement - 位移；Coefficient value - 系数值

Raychem RPG 公司, 印度

# 多物理场仿真 优化气体流量计设计

随着对化石燃料的依赖逐步减少,印度将为越来越多的城市家庭供应管道天然气,以取代煤或木材等产生温室气体较多的燃料。为了优化各种气体流量计的设计, Raychem RPG 的研究人员将目光投向了多物理场仿真。

作者 ADITI KARANDIKAR

20 世纪,印度的能源格局以化石燃料为主,柴油、石油和煤油被用于大部分工业和家庭应用中。在印度农村,很大一部分人口仍在使用煤、木材或粪火做饭。然而,在过去的几十年里,随着液化石油气和压缩天然气在烹饪甚至交通运输中的广泛应用,印度致力于发展成为一个使用更多气体燃料的经济体。最近,印度已经为许多城市家庭供应管道天然气,为家庭烹饪直接供应不间断的气体燃料。这一新的发展要求天然气供应商能够测量天然气的消耗量。燃气表就是常用的气体流量测量设备。



图 1 气体流量计。图片由 Raychem RPG 提供。

## » 气体流量计的原理

气体流量计(图 1)是一种专用于住宅、商业和工业建筑行业的流量计,能够测量通过管道输送的燃气量,如天然气或液化石油气。由于气体的可压缩性以及温度和压力的变化很敏感,因此比液体更难测量。无论流经燃气表的加压气体的体积或质量如何,气体流量计都需要测量出一个确定的体积。因此,需要对温度、压力和热值进行调节,以准确测量实际通过流量计的气体流量。

根据待测气体的体积流量、预期流量范围、待测气体类型以及其他因素,气体流量计有几种常见的不同设计。一些主要的类型包括隔膜流

量计、旋转位移流量计、涡轮流量计、超声流量计和科里奥利流量计。

Raychem RPG 是印度家用燃气表的主要供应商,其产品几乎占据了印度 80% 的市场份额。在位于印度古吉拉特邦(Gujarat, India)的 Raychem 创新中心,研究人员设计开发了 4 种新型气体流量计,并使用多物理场仿真对其进行了概念设计、优化和验证。

## » 气体流量计的设计挑战

目前,印度所有在用的气体流量计都有其自身的局限性。例如,在隔膜流量计中,活动部件和隔膜处气体的泄漏会导致测量误差。旋转位

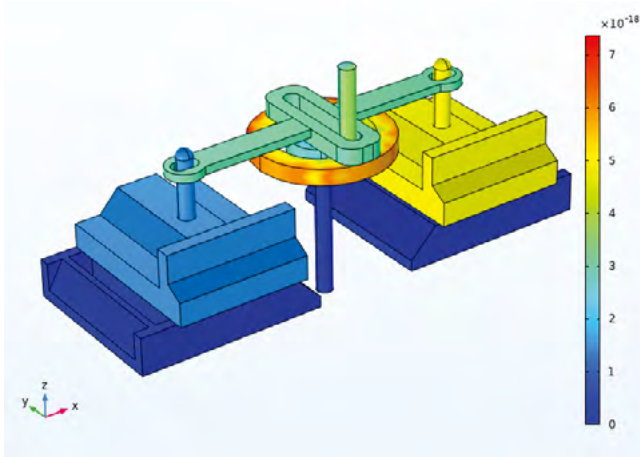


图2 止转枢机构几何形状示意图。

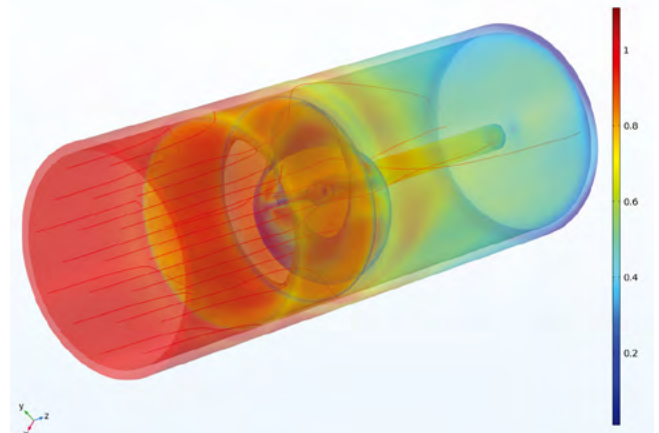
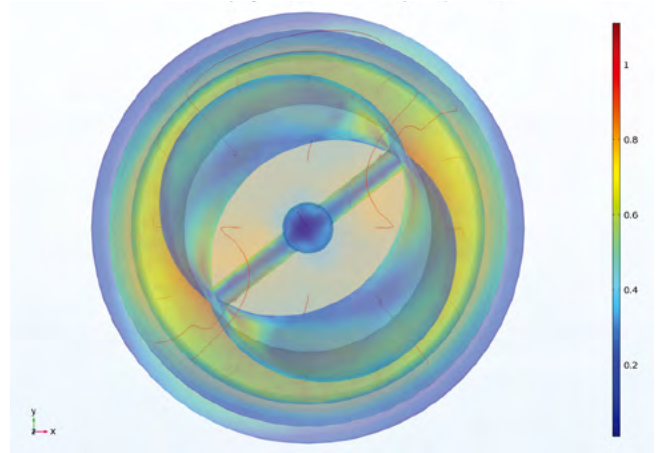
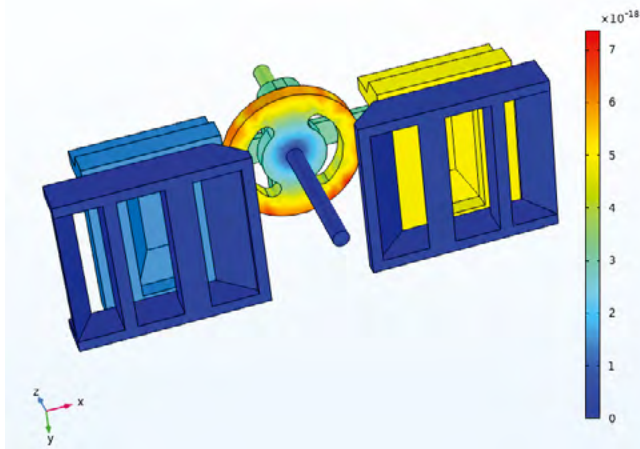


图3 从两个不同的角度显示的莫比乌斯带涡轮流量计中流动气体的速度分布图。

移流量计和涡轮流量计中包含接近 35 个零部件,使得发生故障和机械疲劳的概率增加。此外,由于所有气体流量计的外壳尺寸都是固定的,任何新的设计都必须符合给定的气体流量计外壳尺寸。因而,设备的尺寸是所有气体流量计设计过程中的一个重要因素。上述这些不同的设计标准为这些设备通过最终质量测试带来挑战。实际上,不通过率非常高。

在质量测试阶段,由 Ishant Jain 领导的 Raychem 团队致力于最大限度地减少气体流量计中的组件数量,同时降低废品率,从而降低这些设备的总制造成本。为此, Raychem 团队使用 COMSOL Multiphysics® 软件进行了模拟和分析。

### » 通过仿真验证 4 种气体流量计的设计

基于使用 TRIZ (一种解决问题的方法论) 的设计优化和客户要求, Raychem 团队开发了 4 个气体流量计。团队首先验证了设计传统气体流量计的有限元模型,随后扩展了他们的

发现以评估新的设计。

### » 带止转枢机构的隔膜流量计

第一个新型气体流量计设计是对现有隔膜系统进行修改,即用止转枢机构取代受电弓组件,以减少部件数量。

经过 Raychem 团队优化后的新设计(图 2),不但使测量的准确度和灵敏度提高,还从原始设计中移除了几个机械部件,使仪表系统中的部件数量大幅减少,将早期隔膜设计中的 35 个部件减少到

5~6 个部件,从而确保了系统的机械强度和完整性。

### » 带莫比乌斯带的涡轮流量计

第二个设计包含一个莫比乌斯带涡轮机,通过涡轮机的旋转来测量气体流速,即通过测定气体通过莫比乌斯带涡轮机的速度来测量气体体积。莫比乌斯带形转子位于气流通过的路径上,用于使轴旋转,并将轴的输出传递至锥齿轮系统。涡轮机推断出气体的流动速度,然后以机械

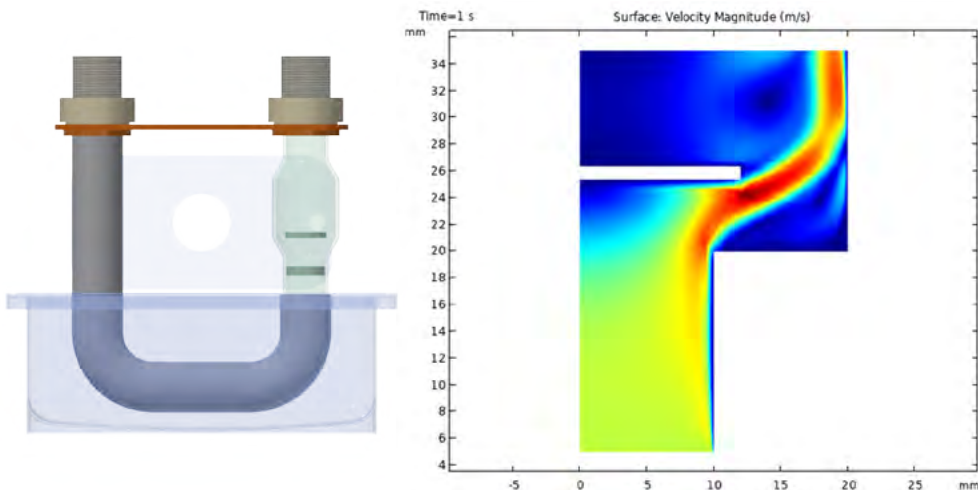


图 4 磁球 / 圆盘流量计的设计概念图(左) 和流体引起的圆盘运动的仿真结果(右)。

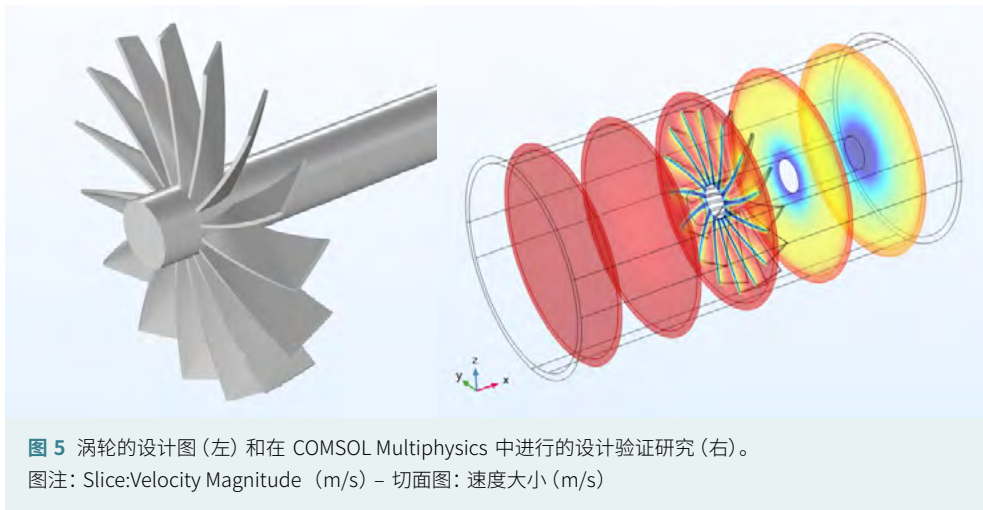


图 5 涡轮的设计图(左) 和在 COMSOL Multiphysics 中进行的设计验证研究(右)。  
图注: Slice: Velocity Magnitude (m/s) - 切面图: 速度大小 (m/s)

方式将其传输到电子或机械计数器内。Raychem 团队使用 COMSOL Multiphysics 模拟了湍流气流(图 3) 以及涡轮机中产生的应力和扭矩。

需要注意的是, 当气体流速较高时, 莫比乌斯带涡轮气体流量计也能较好地运转。由于气体体积由其流量决定, 因此在低压降下测量流量时, 设备的功效受到限制。为了解决这个问题, Raychem 团队根据“同极磁铁排斥”的原理设计了另一种流量计。

### » 带磁球/圆盘的涡轮流量计

在第三个流量计设计中, 团队利用磁力以漂浮的方式将一个物体(通常是一个球或一个圆盘) 安置在管道内。物体随着管道中气体的流动而上升, 气体流量通过磁性板上升的高度来

测量。这种流量计灵敏度很高, 甚至可以测量很小的压降。研究人员使用 COMSOL® 软件研究了该流量计的磁性能和器件性能, 并对设计进行了优化(图 4)。在此基础上, 该团队设计出一种高灵敏度的设备, 即使在气体流速略有变化的情况下也能良好运转。

### » 带叶片的涡轮流量计

最后一个设计也是基于涡轮机的旋转, 但是使用了不

同的涡轮机设计。在这个设计中, 带有固定导向叶片和转轮叶片的涡轮机部件作为阻塞元件被放置在主通道中(图 5)。旋转涡轮机捕获的能量用于为热传感器供电, 使该设备成为一个自供电系统。导向叶片起到喷嘴的作用, 将气流导向转轮叶片, 使其带动轴和锥齿轮副旋转。气体流量是基于锥齿轮副的旋转或通过热传感器测量温度的下降来测量。通过仿真研究, Raychem 团队设计了一种智能型气体流量计, 其外壳非常紧凑, 仅含一个 U 形管和一个传感器, 并且易于安装。

### » 未来研究计划

经过验证的仿真结果是 Raychem 公司 4 种新型气体流量计设计的核心。Raychem 团队对这些能够满足国内和工业应用要求的流量计性能充满信心。这些新设计的气体流量计已经列入生产计划, 应该很快就会提供给印度各地的城市用户, 被直接安装在他们家中的燃气表内。☺

### 致谢

Raychem 团队对协助 TRIZ 申请的 Tito Kishan, 协助设计工程的 Ganesh Bhoje 表示感谢。



Forschungszentrum Jülich 研究中心, 德国

# 仿真优化高性能钨材料的制备工艺

高性能聚变反应堆需要高性能材料。Forschungszentrum Jülich 研究中心能源与气候研究所和德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所的研究人员借助多物理场仿真技术,对聚变反应堆偏滤器的高性能钨材料制备工艺进行了优化。

作者 BRIANNE CHRISTOPHER

为了使聚变发电不仅在物理上而且在经济上可行,需要开发高性能聚变反应堆,然而,这需要使用高性能材料。接下来,我们以反应堆的众多部件之一——偏滤器为例来说明。

偏滤器(图 1)用于将灰分和其他等离子体杂质偏滤出聚变室,它必须能够承受整个反应堆装置中的严苛环境。制造偏滤器组件的最佳材料是钨。由钨材料制成的偏滤器组件在受到

中子猛烈轰击,等离子体腐蚀以及热循环影响下,仍具有合理的运行寿命,并且能够耐受大型粒子和热循环。不同于其他偏滤器材料,钨具有高热导率,并且不会因为嬗变而产生

半衰期较长的放射性同位素,也不会捕获过多的氢。

## » 高性能钨材料

钨材料也有缺点,它通常是脆性的,在受到中子轰击和过热的影响后,甚至可能在聚变反应堆的运行期内进一步脆化。解决钨脆化问题的一种方法是生产一种被称为钨-纤维增强钨( $W_f/W$ )的材料。这种材料所具有的复合结构可以消除裂纹,从而使其具有类似于纤维增强陶瓷的伪延性复合性能。

化学气相沉积法(CVD)是当前制备 $W_f/W$ 材料的工艺之一,也是半导体工业中常用的生产工艺。在CVD工艺中,气体分子吸附在包含一个

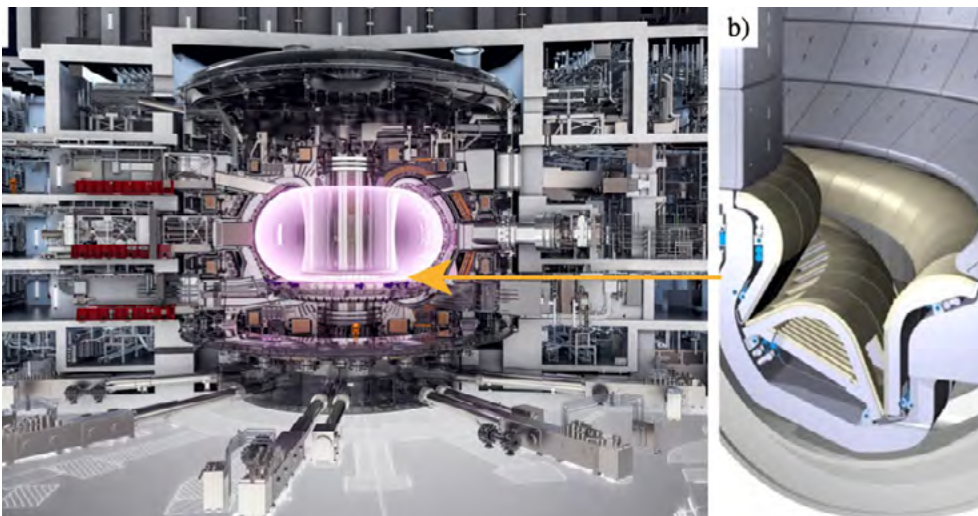


图 1 聚变反应堆中的偏滤器。



图2 化学气相沉积(CVD)生产设备的外部(上)和内部(下)。



图3 钨-纤维增强钨材料(W<sub>f</sub>/W)中孔隙的形成。

加热基板的反应室表面并发生反应(图2),反应产生的高纯度薄膜材料层(钨)将沉积在基板上。为了确保通过该工艺制备的 W<sub>f</sub>/W 材料可用于聚变反应堆,需要对 CVD 工艺进行优化,以使反应生成材料的相对密度和纤维体积分数符合预期要求。德国于利希研究中心(Forschungszentrum Jülich GmbH)能源与气候研究所和德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所(Max Planck Institute for Plasma Physics)的研究人员对 CVD 工艺及其优化进行了研究。

### » 为高性能钨材料的CVD工艺生产开发完整模型

CVD 工艺制备 W<sub>f</sub>/W

材料的关键因素之一是钨的沉积速率,取决于温度与分压。钨的沉积速率难以预测,因为其涉及多个不同的参数,包括反应区域的表面温度和分压,这些又依赖于反应器几何形状、加热器温度、气体流速和气体组成。

预测 CVD 工艺的一个重要目的是避免钨材料中形成孔隙(图3)。在 CVD 工艺中,气体流过纤维基板,钨沉积在纤维的间隙。理论上,纤维间隙应该被固态钨填满,但是当大部分气相路径被钨沉积物封闭或堵塞时,一些气态域可能会与新的反应物隔离。也就是说,这些孔隙无法接触到本应由钨填充的反应物,因此在整个工艺中它们仍然保持孔状。

为了避免或减少形成会降低材料强度的孔隙,需要仔细调整基底的几何形状和 CVD 工艺参数。

为了降低 W<sub>f</sub>/W 材料的孔隙率,于利希研究中心的材料工程师 Leonard Raumann 首先需要找到可用的钨沉积速率方程。现有的关于钨的 CVD 工艺的文献报道存在争议,并且不完整,因为不同研究中的钨沉积动力学方程和取值经常相互矛盾。综合多篇文献的研究成果,Raumann 建立了一个新的速率方程用于描述 CVD 工艺(参考文献1)。那么,他是如

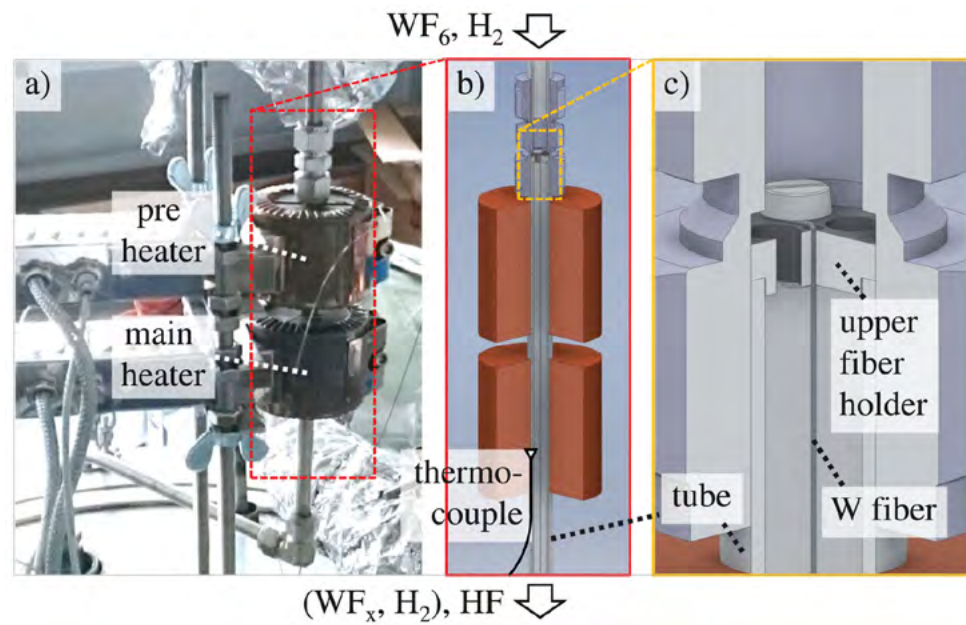


图4 基于简化的实验装置建立的模型几何形状。右侧为钨纤维(细灰色垂直线)。图注: pre heater- 预热器; main heater- 主加热器; thermocouple- 热电偶; tube- 管; upper fiber holder- 上部纤维夹持器; W fiber- 钨纤维

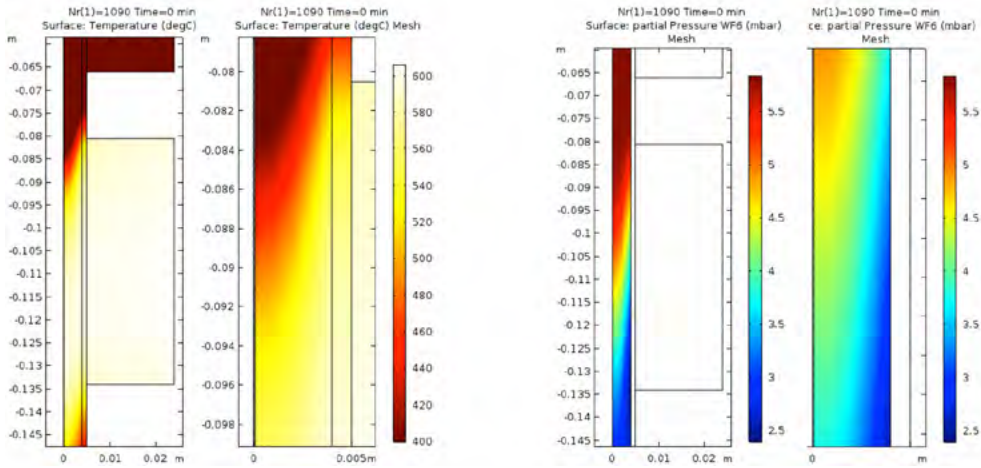


图 5 CVD 工艺中的温度(左)和分压(右)。半径(r)为 0.075 cm 的纤维表面和半径(r)为 0.4 cm 的内管表面。

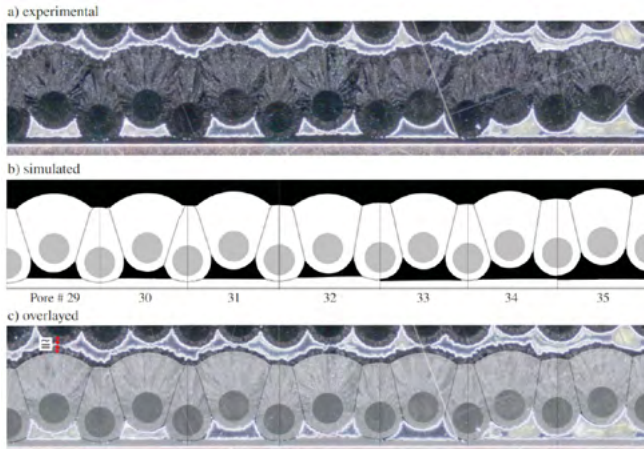


图 6 CVD 工艺中孔隙形成的实验结果(顶部)、模拟结果(中间)和两个结果的叠加图(底部)。

何建立的呢?

首先, Raumann 使用最常用的边界条件设计了单根纤维的制备试验,并借助 COMSOL Multiphysics® 软件进行参数化研究,找到了合适的速率方程。然后,使用该方程对多根纤维的  $W_f/W$  材料制备进行了建模。他还使用 COMSOL® 软件进行了参数优化,最终得到的参数在实际生产中取得了成功。

### » 多物理场模型的开发和验证

开发新的钨 CVD 速率模型的单纤维装置如图 4 所示,模型包括一个预热器和一个主加热器。研究人员希望了解钨的生长速率,以及温度和分压对它产生的影响。他们根据温度和六

氟化钨( $WF_6$ )分压将  $WF_6$  的反应阶次调整为 1 到 0 之间。然后,他们使用数值模型研究了混合气体的流体动力学,热损耗引起的传热,以及沉积物表面化学反应的化学方程和速率方程。

为了将宏观 CVD 反应器模型计算得到的分压作为微观瞬态仿真的输入参数, Raumann 对生长在多根相邻钨纤维上的钨涂层,涂层的表面到表面接触,以及可能形成的孔隙进行了建模。在 Raumann 的论文(参考文献 1)中,他将模拟结果与实验得到的  $W_f/W$  材料 CVD 工艺的沉积速率、孔结构和相对密度进行了对比(图 6),成功地验证了模型。最后,他使用多根纤维模型对 CVD 工艺参数进行优化,提高了模拟中以及后续实验中获得的材料密度。

### » 未来研究: 模型的扩展与应用

目前,于利希研究中心能源与气候研究所联合马克斯·普朗克等离子体物理研究所的研究团队正在计划将经过验证的模型应用于三维结构,以进一步扩大  $W_f/W$  材料的产量。为此,他们计划开发一种新方法,即通过一个非束缚的线圈向另一个卷绕和加热的线圈传送钨纤维(CVD 基材)。这样,纤维结构层的堆积可以在封闭腔室内进行,从而能够一次性在 CVD 工艺中沉积所有层,同时该方法也降低了污染的风险。

扩大  $W_f/W$  材料的生产规模意味核聚变发电具有新的可能性。在进行这项研究之前,生产一层钨材料大约需要 5 小时,通过对 CVD 工艺进行参数优化后,仅需 30 分钟即可生产出一层  $W_f/W$  材料——生产效率提升了 10 倍!通过多物理场仿真优化聚变反应堆高性能材料的生产工艺,可以确保核聚变发电既切实可行又具有成本效益。◎

### 参考文献

1.L. Raumann, Modeling and validation of chemical vapor deposition for tungsten fiber reinforced tungsten, dissertation, Energy & Environment, Schriften des Forschungszentrums Jülich, 2020.

# 仿真 App 助力测试、检验和认证行业的数字化创新

作者 JAMES DEAN

全球测试、检验和认证 (TIC) 行业的市场价值约为 2500 亿美元。发展中经济体的快速发展、制造商大量采用外包服务模式、对采用统一标准需求的增加, 以及各部门对政府法规和标准的严格执行, 都在推动着这一市场的增长。该领域的许多公司正在评估他们的投资和收购战略, 以利用新兴和创新技术。例如, Element Materials Technology 公司最近建立了一个 1000 万美元的创新基金, 用于技术导向的投资。

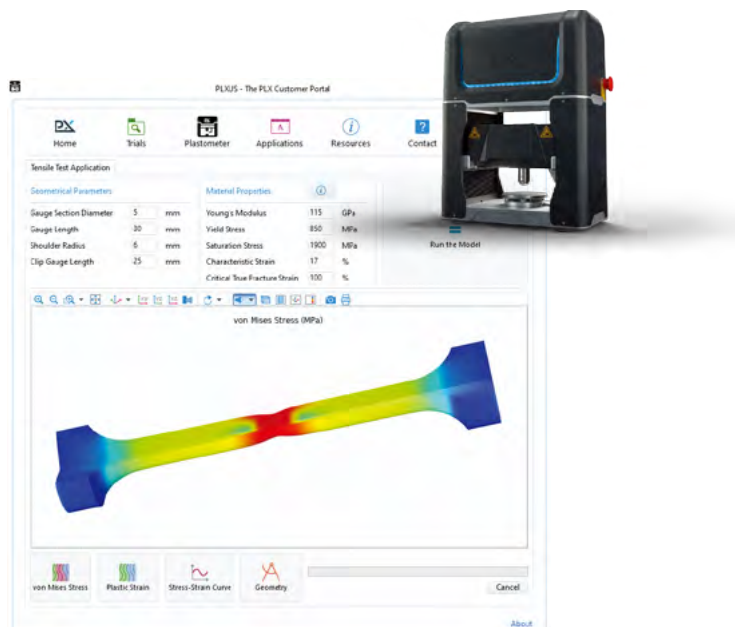
无论是创新、收购还是投资, 目前该领域的许多活动都蕴含“数字化”。很多公司也正在创建、孵化或获取数字化能力, 以配合他们围绕工业 4.0 的数字化创新计划和雄心, 从而加快解决方案和应用程序的交付和供应。这其中的核心是仿真以及仿真 App 的开发与部署。众所周知, 仿真是创新的关键因素。

仿真驱动创新。Plastometrex 是一家位于英国剑桥的科技公司, 主要为 TIC 领域开发数字化新型力学测试系统。结合使用公司的硬件系统, Plastometrex 开发的软件包使力学测试变得快速和灵活。重要的是, 测试结果能深入地反映更多信息。他们使用 COMSOL Multiphysics® 软件及其内置的 App 开发来开发这些产品。

2020 年 11 月, 公司推出了第一款商业化产品——压痕塑性计。该产品使用一种叫做压痕塑性测量法的技术快速测量应力 - 应变曲线和金属强度参数, 不用 3 分钟即可完成一次压痕测试。它不仅能够便捷、简单地进行硬度测试, 还可以获得以往需要通过拉伸试验才能获得的有意义的强度信息。该产品解决了传统拉伸试验中一系列繁琐的问题。由于不需要制作拉伸测试试样, 因此比拉伸试验更快速。可以测试微型材料和真实的组件, 绘制表面 (例如焊缝表面) 的特性图, 探究增材制造组件的特性, 等等。此外, 高通量是该产品的另一优势。

Plastometrex 的进步得益于 COMSOL® 提供的数字化工具, 这些工具现在正使 TIC 行业, 以及近百年来未发生重大变化的一系列测试技术实现现代化和数字化。例如, 压痕塑性测量的基础数学框架涉及逆有限元分析和优化方法, 这正是 COMSOL® 多物理场仿真软件提供的功能。正是通过强

大、多功能和自定义仿真 App 部署这些功能, 才奠定了 Plastometrex 公司早期成功的基础。我们正在新产品计划中使用 COMSOL 的数字化仿真工具, 希望藉此能进入全球 TIC 市场, 并在该领域中保持竞争力。



一个仿真 App 示例以及 Plastometrex 公司的压痕塑性计 (右上小图)。



## 关于作者

James Dean 毕业于伦敦帝国理工学院 (Imperial College), 获材料科学专业学士学位, 之后又分别获得克兰菲尔德大学 (Cranfield University) 燃气轮机工程硕士学位和剑桥大学 (University of Cambridge) 材料学博士学位。他曾任剑桥大学卡文迪许实验室材料科学计算方法博士培训中心 (the Centre for Doctoral Training in Computational Methods for

Materials Science at the Cavendish Laboratory) 的协调专员和高级教学助理, 是 Double Precision 咨询公司的创始人。该公司是 COMSOL 认证的咨询公司, 已于 2021 年 1 月出售。现任 Plastometrex 公司 CEO, 是该公司创始人之一。